

o. PROF. DR.-ING. KARL KORDINA - TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
Lehrstuhl für Stahlbeton- und Massivbau · Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau

B e r i c h t
über eine im Dezember 1977 durchgeführte
Probebelastung an der Krähwinkler Brücke
im Zuge der L 412

erstattet von

o.Prof. Dr.-Ing. K. Kordina
Dr.-Ing. G. Iványi
Dipl.-Ing. D. Nölting

B I B L I O T H E K
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

im Auftrage des Landschaftsverbandes Rheinland
Landesstraßenbauamt Düsseldorf/Best.Nr. 16/78 Schg

Braunschweig, April 1978

Postsendungen:
3300 Braunschweig, Beethovenstraße 52
Fernschreiber: 0 52 095 1bstb d

Fernsprecher:
301 28 70
Ortskennzahl 05 31
Kornat keine Verbindung zustande
bitte Nr. 301 22 01

Besuchszellen:
Montag bis Freitag 9-15 Uhr

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung, Zielsetzung	1
2. Meßeinrichtung	2
2.1. Verformungs- und Dehnungsmessungen	2
2.2. Temperaturmessungen	4
3. Belastung	4
3.1. Belastungsfahrzeuge	4
3.2. Statische Laststellungen	5
3.3. Rollende Belastung	5
3.4. Fließender Verkehr	6
3.5. Bremsen	6
4. Meßergebnisse	6
4.1. Dehnungs- und Rißbreitenänderungen	6
4.2. Temperaturen	7
5. Schnittgrößen in den untersuchten Koppel- querschnitten	8
6. Auswertung der Meßergebnisse	8
6.1. Allgemeines	8
6.2. Ermittlung der Spannungsänderungen des Spannstahls	11
6.3. Beanspruchung unter definierter rollender Belastung	14
6.4. Beanspruchung unter fließendem Verkehr	15
6.5. Beanspruchung beim Bremsen	15
7. Deutung und Bewertung der Meßergebnisse	16
7.1. Rechnerisches Tragverhalten der unter- suchten Koppelfugen	16

	Seite
7.2. Tragverhalten der untersuchten Koppel- fugen aufgrund der Messungen	19
7.3. Diskussion der Ergebnisse	21
8. Zusammenfassung	24

V O R B E M E R K U N G

Die Zahlenrechnungen des vorliegenden Berichtes schlieÙen an die statische Berechnung aus dem Jahre 1966 und an die von Prof. Kordina erstellte gutachterliche Stellungnahme vom 24.10.1977 an. Im Interesse einer einheitlichen Darstellungsweise wurden deshalb in diesem Bericht noch die neu eingeführten SI-Einheiten verwendet.

1. Einleitung, Zielsetzung

Die Krähwinkler Brücke im Zuge der L 412 wurde in den Jahren 1966/67 in feldweisem Vorbau mit einem freitragenden Vorschubgerüst hergestellt. Der Überbau mit einzelligem Hohlkastenquerschnitt erstreckt sich über 7 Felder mit Stützweiten von 31,88 m - 5 x 41,45 m - 31,88 m. Er ist in Längsrichtung mit $2 \times 8 = 16$ Spanngliedern A 200 des Spannverfahrens "Polensky & Zöllner" vorgespannt. Statistisches System und Querschnitt sind in Anlage 1 dargestellt.

Im Jahre 1976 wurden am Überbau der Brücke im Zuge einer Hauptuntersuchung Risse in den Koppelfugen festgestellt. Die Rißbreiten betrugen in der Bodenplatte in Brücken-Längsachse 0,5 bis 1,2 mm, in der Nähe der Steganschnitte 0,2 - 0,8 mm; die Risse setzten sich in den Stegen bis etwa zur halben Querschnittshöhe fort (s. Anlage 2). Der Zeitpunkt des Entstehens der Risse ist nicht bekannt. Die beobachteten Risseschäden veranlaßten den Landschaftsverband Rheinland, die Koppelquerschnitte unter Beachtung des Änderungsbescheides zum Spannverfahren PZ vom 08.02.1977 in statischer Hinsicht überprüfen zu lassen. Aus einem daraufhin von Prof. Kordina am 24.10.1977 erstellten Gutachten geht hervor, daß eine Schwellbeanspruchung von der Größe der halben Verkehrslast gemäß DIN 1072 bzw. 1075 unter der anzunehmenden Grundbelastung -Eigengewicht und 10 K Temperaturunterschied zwischen Querschnittsoberseite und -Unterseite - an keiner der 6 Koppelfugen eine Überschreitung der zulässigen Spannungsänderung von $\text{zul. } \Delta \sigma_z = 800/1,45 = 552 \text{ kp/cm}^2$ verursacht. Erst wenn unterstellt

wird, daß die Spannkräfte, begrenzt auf den Bereich der Koppelfugen, auf 80% ihrer Sollwerte abgefallen wären, würden die rechnerischen Spannungsänderungen an einigen Koppelstellen unzulässig hohe Werte annehmen. Die größte Schwingbreite würde dann in der Koppelfuge f $\Delta \sigma_z = 964 \text{ kp/cm}^2$ betragen.

Ziel der nachfolgend beschriebenen Probebelastungen am Brückenbauwerk war es, durch Messung der Verformungen und Temperaturen darüber Aufschluß zu gewinnen, ob die rechnerisch ermittelten Stahlspannungsänderungen zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit des Bauwerks als wirklichkeitsnah angesehen werden dürfen. Bei der Wahl des winterlichen Termins - Dezember 1977 - wurde bewußt eine klimatische Bedingung gesucht, die am Tage der Messungen einen möglichst geringen Temperaturunterschied zwischen Fahrbahn- und Bodenplatte des Hohlkastens sicherstellte. Um das andere Extrem, nämlich sommerliche Witterungsverhältnisse mit möglichst großen Temperaturgradienten, ebenfalls erfassen zu können, wurden die Temperaturmeßstellen auch für Dauermessungen geeignet installiert. Eine Wiederholung der hier beschriebenen Messungen soll Anfang Juni 1978 stattfinden.

2. Meßeinrichtung

2.1. Verformungs- und Dehnungsmessungen

Entsprechend den Voruntersuchungen der gutachtlichen Stellungnahme - vgl. Abschnitt 1 - wurden die Messungen auf die Koppelfuge f konzen-

triert; weitere Meßstellen wurden in den benachbarten Koppelfugen e und d angeordnet. Einen Gesamtüberblick über alle Meßstellen gibt Anlage 3; Details sind den Anlagen 4 und 5 zu entnehmen.

Die Meßwerte wurden mit Hilfe eines 12-Kanal-Lichtstrahloszillographen aufgezeichnet, wodurch eine kontinuierliche Registrierung aller Daten ermöglicht wurde. Hierdurch war allerdings auch die Anzahl der insgesamt anzuordnenden Meßstellen auf 12 begrenzt:

Meßstelle 1 bis 4: Induktive Weggeber für einen Meßweg von $\pm 1,0$ mm mit einer Meßbasis von ca. 12 cm Länge zur Messung der Dehnungsänderungen der Koppelanker in der untersten Spanngliedlage.

Meßstelle 5 bis 10: Induktive Weggeber für einen Meßweg von maximal $\pm 1,0$ mm mit einer Meßbasis von ca. 2 cm zur Messung der Rißbreitenänderungen.

Meßstelle 11 und 12: Dehnungsmeßstreifen an Einzeldrähten des Spanngliedes mit einer aktiven Länge von 1,5 mm zur Messung der Dehnungsänderungen des Spannstahls innerhalb des Koppelbereiches, in beiden Richtungen ca. 90 cm von der Koppelfuge f entfernt.

Aus meßtechnischen Gründen konnten die zuletzt genannten beiden Meßstellen nicht gleichzeitig abgelesen werden, so daß zusammengehörende Meßwerte nur bei wiederholten Laststellungen erzielt werden konnten.

2.2. Temperaturmessungen

Um den Temperaturzustand des Bauwerks zu definieren, wurden 22 in Anlage 6 dargestellte Temperaturmeßstellen eingerichtet.

In Bohrlöcher \varnothing 16 mm wurden Thermoelemente - NiCr \varnothing 0,5 mm/Ni \varnothing 0,5 mm - eingeführt. Die Bohrlöcher wurden mit Asbestschnur gefüllt und mit Silikonkautschuk verschlossen. Die Thermospannungen wurden von einem kompensierten Temperaturmeßgerät erfaßt. Eine geeichte Skala erlaubt es, an dem Gerät sofort die Temperaturen abzulesen.

Die beschriebene Meßeinrichtung wurde nach Beendigung der Messungen nicht abgebaut, so daß auch weiterhin die Möglichkeit besteht, Temperaturschwankungen innerhalb des Brückenquerschnitts zu beliebigen Zeitpunkten zu erfassen.

3. Belastung

3.1. Belastungsfahrzeuge

Die Probelastung am 15.12.1977 wurde mit 4 Erdbaufahrzeugen von je rd. 40 Mp Gesamtgewicht durchgeführt. Die Achsabstände und -lasten der verwendeten Fahrzeugtypen sind in Anlage 7 zusammengestellt.

Es wurden im Hinblick auf die Brückenachse symmetrische wie auch einseitige Laststellungen aufgebracht; die Lastanordnung im Querschnitt ist ebenfalls Anlage 7 zu entnehmen.

3.2. Statische Laststellungen

Insgesamt wurden folgende statische Laststellungen in Bezug auf die Brückenlängsrichtung verwirklicht (vgl. Anlagen 7 und 8):

- In Bezug auf den Brückenquerschnitt symmetrische Laststellungen mit 2 x 2 Fahrzeugen zur Erzeugung von min M und max M in den Koppelfugen f, e und d (Bezeichnung F1, F2, E1, E2, D1, D2). Diese 6 Laststellungen wurden zur Kontrolle zweimal - im Abstand von ca. 2 Stunden - aufgebracht und gemessen.
- In Bezug auf den Brückenquerschnitt einseitige Laststellungen wie vor mit jeweils 2 Fahrzeugen in ungünstigster Anordnung auf der südlichen und anschließend auf der nördlichen Fahrbahnseite. (Bezeichnung F1S... D2S und F1N... D2N).
- Symmetrische Laststellungen mit 2 Fahrzeugen vom Typs S jeweils im gleichen Brückenquerschnitt in allen 1/10-Punkten der Überbaufelder (Bezeichnung der Laststellungen 1... 71 nach den durch die Vorderachsen der Fahrzeuge belasteten 1/10-Punkten, bzw. bei Zwischenlaststellungen z.B. 59,5 für die Stellung der Vorderachse im 1/20-Punkt zwischen Punkt 59 und 60. Vgl. Anlage 1 und 8).

3.3. Rollende Belastung

Die o.g. Fahrzeuge befuhren die Brücke in der Brückenachse einzeln mit Geschwindigkeiten von 50, 60, 70 und 75 km/h.

3.4. Fließender Verkehr

Das Verkehrsaufkommen während einer ca. 5-stündigen Messung unter fließendem Verkehr bestand aus mehreren fast leeren Linienbussen, einigen Kleinlastwagen und zum überwiegenden Teil aus Personenkraftwagen.

3.5. Bremsen

Die Beanspruchung des Überbaus bei scharfem Bremsen der Belastungsfahrzeuge in verschiedenen Brückenfeldern wurde für beide Fahrtrichtungen untersucht.

4. Meßergebnisse

4.1. Dehnungs- und Rißbreitenänderungen

Die gemessenen Dehnungs- ($\mu\text{m}/\text{m}$) und Rißbreitenänderungen (μm) sind in den Anlagen 9 - 14 tabellarisch zusammengestellt.

Bei Mehrfachmessungen (Anlage 9) wurden beide erzielten Werte und auch der Mittelwert angegeben. Die zugehörigen Meßwerte der einseitigen Laststellungen enthält Anlage 10 einzeln und auch aufsummiert. Die angegebene Summe entspricht den Tabellenwerten der Anlage 9.

Anlage 11 gibt die Meßwerte wieder, die aus Lasten in den Zehntelpunkten des Überbaus (jeweils 2 Fahrzeuge Typ S nebeneinander) gewonnen wurden. Hierbei sind nur jene Meßstellen wiedergegeben, die bei der entsprechenden Laststellung meßbare Größen ergaben.

Zur Veranschaulichung der Tabellenwerte wurden diese in der Anlage 12 auch über die Tragwerksachse aufgetragen. Dabei sind die Meßwerte an der Brückenachse jeweils dort aufgetragen, wo sich bei der betreffenden Laststellung der Schwerpunkt der Fahrzeuge befand, d.h. 5,80 m ($\hat{=}$ Abstand der Vorderachse vom Fahrzeugschwerpunkt) hinter dem die Laststellung bezeichnenden Schnitt.

Die in Anlage 13 zusammengestellten, unter rollenden Erdbaufahrzeugen gewonnenen Meßwerte dienen der Ermittlung eines Schwingbeiwertes.

In Anlage 14 sind die am Tage der Messung unter fließendem Verkehr festgestellten Extremwerte der Verformungs- und Dehnungsänderungen in den Meßquerschnitten zusammengestellt. Zum besseren Vergleich sind hier auch die bei den Probelastungen erreichten Maximalwerte angegeben.

4.2. Temperaturen

Die Ergebnisse der Temperaturmessungen sind in Anlage 15 wiedergegeben.

Da das zur Ablesung der Temperaturmeßwerte verwendete Meßgerät bei niedrigen Gerätetemperaturen lediglich die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Meßstellen, nicht aber die absoluten Temperaturen mit den hier erforderlichen Genauigkeiten angibt, sind nur die Differenzen der gemessenen Temperaturen gegenüber einem Bezugswert verwendbar. Als Bezugswert wurde in Anlage 15 die Temperatur in Stegachse in Höhe der Querschnittswerachse gewählt.

5. Schnittgrößen in den untersuchten Koppelquerschnitten

Die Schnittgrößen aus ständigen Lasten - Eigengewicht und Vorspannung - sowie aus Temperatur und Verkehr wurden der gutachtlichen Stellungnahme vom 24. Oktober 1977 - s. Abschnitt 1 - entnommen. Die aus den im Zuge der Probelastung aufgebrachten Belastungen resultierenden Beanspruchungen wurden elektronisch ermittelt. Alle zur weiteren Auswertung erforderlichen Schnittgrößen wurden am ungerissenen Tragwerk nach der Balkentheorie gewonnen (s. Anlage 16).

6. Auswertung der Meßergebnisse

6.1. Allgemeines

Wie in Abschnitt 2.1. beschrieben, waren während der Messungen alle Meßstellen an einen Lichtstahl-oszillographen angeschlossen, der sämtliche Meßwerte kontinuierlich aufzeichnete. Die Aufzeichnung erfolgt hierbei auf einer lichtempfindlichen Papierrolle, die mit einstellbarer Geschwindigkeit bewegt wird. Die Längsachse des Papierstreifens ist die Zeitachse, Ausschläge quer dazu entsprechen den erzielten Meßwerten, verzerrt durch einen vorgegebenen Maßstabfaktor. In diesem Koordinatensystem entsprechen demnach die kontinuierlich aufgezeichneten Meßwerte einer Meßstelle am unbelasteten Tragwerk bei konstanter Temperatur einer zur Zeitachse parallelen Geraden. Plötzliche Belastungen ($t_{\text{Bel}} \rightarrow 0$) würden einen senkrecht zur Zeitachse stehenden Ausschlag verursachen. Langsamere Vorgänge - zeitlich definierte Lastaufbringungen oder Temperaturdehnungen - führen auf eine i.d.R. stetig gekrümmte Linie (vgl. Bild 1).

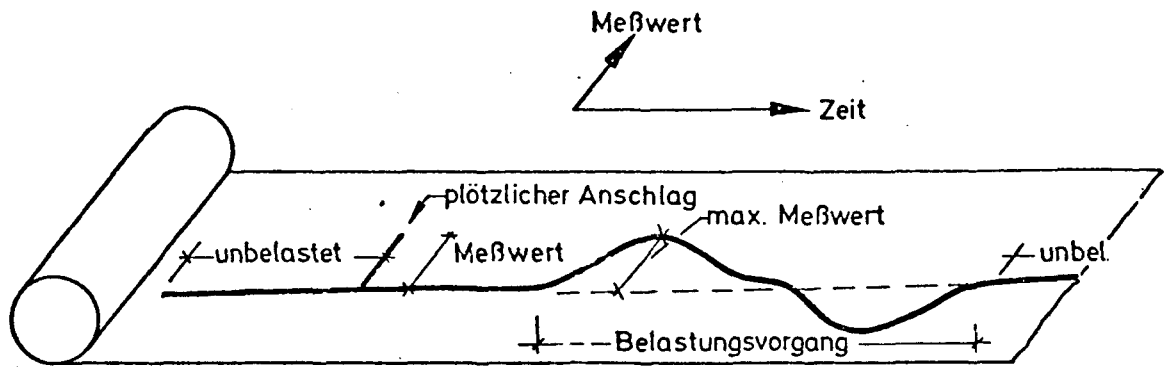


Bild 1

Bei Messungen mit längerer Dauer, insbesondere bei solchen im Freien, beobachtet man häufig, daß die dem unbelasteten Tragwerk entsprechenden "Nulllinien" allmählich verändert werden, indem sie nicht mehr parallel zur Achse des Papierstreifens verlaufen.

Eine solche Abweichung, d.h. eine Veränderung des ursprünglichen "Nullwertes" einer Meßstelle, kann im allgemeinen auf folgende Gründe zurückgeführt werden:

- Zeitliche Veränderung der Eigenschaften des Meßwerterfassungssystems einschließlich von Fehlern im Auftragungssystem.
- Zeitliche Veränderung der Eigenschaften der Meßwertaufnehmer - (Dehnmeßstreifen und Weggeber).
- Zeitliche Veränderung der Eigenschaften des Meßobjektes z.B. Dehnungen im Bauwerk infolge Temperatureinwirkungen.

Die ersten beiden Gründe sind im vorliegenden Fall infolge der verhältnismäßig kurzen Dauer der Messungen praktisch vernachlässigbar, so daß etwa festgestellte Abweichungen gänzlich dem dritten Grund, nämlich Veränderungen am Tragwerk selbst zuzuweisen sein dürften.

Eine Veränderung der zu Versuchsbeginn eingestellten "Nullwerte" der Meßstellen beeinflußt nicht die sichere Erfassung von Einwirkungen, die aus einer Kurzzeit-Belastung resultieren, sofern vor Beginn und nach Ende einer jeden Laststellung stets auch der Zustand des unbelasteten Tragwerks aufgezeichnet wird. Bild 2 zeigt den Verlauf der Meßlinie, der z.B. einer Be- und Entlastung mit unbelasteten Zuständen vor und nach diesem Vorgang entsprechen würde.

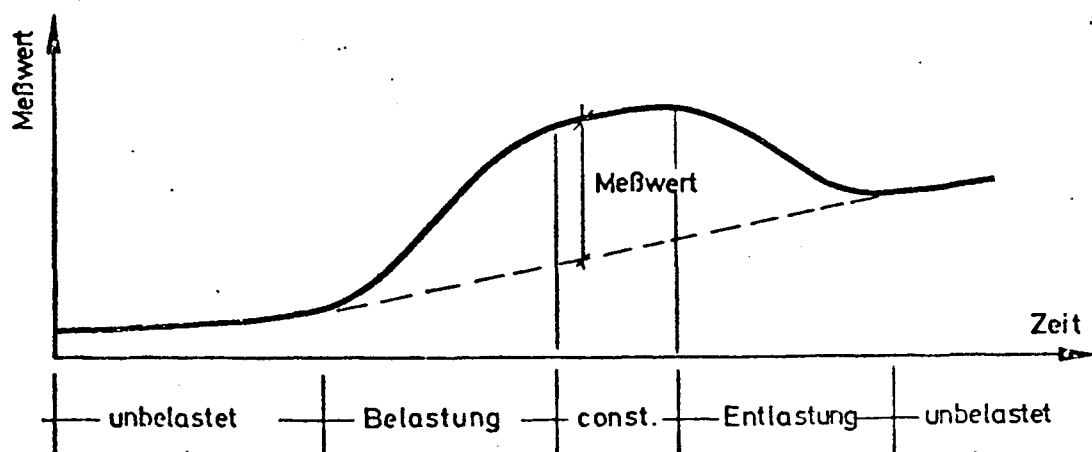


Bild 2

Zu berücksichtigen bleibt dennoch, daß sich der Grundzustand der Brücke während der Verschiebung der Nulllage der Meßstellen verändert haben konnte, wenn diese Änderungen temperaturbedingt eingetreten sind. Besondere Schwierigkeiten bereitet hierbei die Tatsache, daß der vor Beginn der Messungen vorhandene Grundzustand des Tragwerks insbesondere bei Messungen im Freien in der Regel nicht bekannt ist.

Im vorliegenden Fall betrugen die während der Messung beobachteten Veränderungen der Nulllage der Meßwerte ca. $10 \div 20 \text{ } \mu\text{m/m}$ bei den Dehnungen der Koppelanker bzw. ca. $5 \div 10 \text{ } \mu\text{m/m}$ bei den Reißbreiten. Diese Werte sind gegenüber den erzielten Maximalwerten unter Last - bis zu $179 \text{ } \mu\text{m}$ bzw. $87 \text{ } \mu\text{m}$ - sehr gering. Tatsächlich ergaben auch die Temperaturmessungen, daß die Temperaturunterschiede zwischen Zug- und Druckgut des Tragwerks während der Meßdauer nur ca. $0,4 \text{ K}$ betrugen. Hieraus resultierende Biegebeanspruchungen erklären näherungsweise die beobachteten Nullpunktverschiebungen.

Die in den Tabellen 9 - 14 zusammengestellten Meßergebnisse sind jeweils auf den zum Zeitpunkt der Messung gültigen Nullwert bezogen und sind somit für die Beurteilung des Kurzzeitverhaltens als zutreffende Werte anzusehen.

6.2. Ermittlung der Spannungsänderungen des Spannstahls

Die im Abschnitt 4.1 bzw. in den Anlagen 9 bis 14 wiedergegebenen Ergebnisse der Dehnungsmessungen können zu Spannungen bzw. zu Spannungsänderungen umgerechnet werden, bezogen auf einen jeweils zum

Meßzeitpunkt vorhandenen, allerdings nicht exakt bekannten Grundzustand.

Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die meisten im Bereiche der Koppelquerschnitte gewonnenen Dehnmeßwerte am Koppelanker und nicht unmittelbar am Spannstahl erzielt wurden. Da alle Angaben der Zulassungen stets auf den Spannstahlquerschnitt bezogen sind, werden auch hier alle Meßwerte $\Delta\epsilon_A$ - Dehnungsänderungen am Anker - im Verhältnis der Querschnittsflächen $F_A/F_Z = 32,2/24,0 = 1,34$ - Anker zu Spannstahl - vergrößert, um in dieser Weise Spannungsänderungen $\Delta\sigma_z$, bezogen auf den Spannstahlquerschnitt zu erhalten:

$$\Delta\sigma_z = \Delta\epsilon_A \cdot \frac{F_A}{F_Z} \cdot E$$

Ausgehend vom unbelasteten Zustand der Brücke ($M \approx \text{const.}$) lassen sich die in dieser Weise ermittelten Spannungsänderungen für alle Koppelquerschnitte in je einem ΔM - $\Delta\sigma_z$ -Diagramm darstellen; in diesem Diagramm stellt jeder Punkt eine Laststellung mit zugehöriger Spannungsänderung dar (s. Anlagen 17 - 19). Die größten Werte resultieren aus den Hauptlaststellungen D1, D2, E1, E2 und F1, F2. Die maximalen Spannungsänderungen $\Delta\sigma_z$, bezogen auf die zugehörigen Momentenunterschiede ΔM betragen hieraus:

Koppelfuge	Steg	$\Delta M [\text{Mpm}]$	$\Delta\sigma_z [\text{kp/cm}^2]$
f	Nord	596	544
f	Süd	596	499
e	Nord	697	487
d	Nord	703	758

Die symmetrischen Laststellungen in den Zehntelpunkten des Überbaus (vgl. Anlage 11) erscheinen in dieser Darstellung als ein geschlossener Linienzug, jeweils beginnend in jenem Zehntelpunkt, der für den betrachteten Koppelquerschnitt eine deutlich erkennbare Größe der Dehnungen ergab, für Koppelfuge d bei 36, für e bei 46 und für f bei 56.

Beim Betrachten der Diagramme fällt auf, daß die Linienzüge einschließlich der den Hauptlaststellungen entsprechenden Punkte einen leicht gekrümmten Verlauf haben. Die Reproduzierbarkeit von $\Delta M - \Delta \sigma_z$ -Werten aus unterschiedlichen Laststellungen ist auch im Bereich der kleineren Werte noch befriedigend, wenngleich auffällt, daß einem Biegemoment aus Lasten in jenem Feld, das den Meßquerschnitt enthält, größere $\Delta \sigma_z$ -Werte entsprechen als einem gleichgroßen Biegemoment, das aus Belastungen in einem entfernten Feld resultiert. Diese Erscheinung muß vorwiegend auf eine gewisse "Trägheit" der Brücke bei geringeren Beanspruchungen über Zwischenaufleger hinweg zurückgeführt werden.

In ähnlichen Diagrammen können auch die gemessenen Rißbreitenänderungen Δw in Abhängigkeit von der Beanspruchungsänderung dargestellt werden. Die über die Meßstellen 7, 8, 9 und 10 (vgl. Anlage 3) erzielten Meßwerte für die Hauptlaststellungen (Anlage 9) bzw. für die Belastungsfahrzeuge in den Zehntelpunkten (Anlage 11) enthalten die Anlagen 20 - 22.

Meßergebnisse, die aus einseitigen Belastungsanordnungen resultieren, können in $\Delta M - \Delta \sigma_z$ -Diagrammen nicht dargestellt werden, weil die tatsächlichen

Stegmomente mangels genauerer Rechenwerte über die Querverteilung nicht bekannt sind. Die in Anlage 10 aufgeführten Meßwerte zeigen deutlich, daß die übliche Annahme einer "vollen" Querverteilung - kein Einfluß der Lage der Lasten zur Brückenachse - zumindest für Laststellungen im betreffenden Feld nicht zutrifft. So betragen die Dehnungsänderungen am Koppelanker des direkt belasteten Steges etwa das 1,8-fache jener des gegenüberliegenden Steges, was einer Querverteilung von 0,65/0,35 entspricht. Ähnliche Werte ergeben sich auch, wenn man diesen Überlegungen die Rißbreitenänderungen zugrunde legt. Bei Laststellungen außerhalb des betrachteten Feldes gilt allerdings in etwa die übliche Annahme einer "vollen" Querverteilung.

Im Koppelquerschnitt wurden am nördlichen Steg zusätzlich auch Dehnmeßstellen an Einzeldrähten des Spannglieds - jedoch noch innerhalb des eigentlichen Koppelbereichs - angeordnet (vgl. Anlage 4 und 5). Hierdurch war es möglich, in diesem Bereich den Verlauf der Spannungsänderungen entlang der Spanngliedachse zu erfassen. In Anlage 23 sind die Spannungsänderungen $\Delta\sigma_z$ für die maximalen Beanspruchungen zusammengestellt. Die rechnerischen Vergleichswerte nach Zustand I wurden unter Berücksichtigung der genauen Schnittgrößen und Querschnittswerte der drei Schnitte I, II und III ermittelt.

6.3. Beanspruchung unter definierter rollender Belastung

Ein dem Schwingbeiwert Ψ vergleichbarer Erhöhungsfaktor für bewegliche Laststellungen läßt sich aus dem Verhältnis der auf die zugehörigen Biege-

momente bezogenen Dehnungs- und Rißbreitenänderungen unter rollender und statischer Last näherungsweise ermitteln.

Aus dem Vergleich der in den Anlagen 11 und 13 angegebenen Meßdaten ergibt sich dieser zu

$$\varphi \approx 1,00 \div 1,20$$

6.4. Beanspruchung unter fließendem Verkehr

Die in Abschnitt 3.4. beschriebene Belastung durch den fließenden Verkehr bewirkte maximal ca. 15% der bei der Probelastung erreichten maximalen Dehnungs- und Rißbreitenänderungen.

6.5. Beanspruchung beim Bremsen

Lediglich beim Bremsen im Endfeld 7 des in den Mittelstützen - Schnitte 30 und 40 - unverschieblich gelagerten Überbaus wurden in der Koppelfuge f geringe Ausschläge am Meßgerät registriert, die eindeutig auf eine Bremsbeanspruchung zurückzuführen waren. Diese Ausschläge blieben geringer als 20% der durch die entsprechenden Fahrzeuge verursachten Wirkung bei max. ΔM der Probelastung im betreffenden Querschnitt f.

7. Deutung und Bewertung der Meßergebnisse

7.1. Rechnerisches Tragverhalten der untersuchten Koppelfugen

Zur Charakterisierung des Biegetragverhaltens eines Querschnitts unter Vorspannung lassen sich rechnerisch Momenten-Spannstahlspannungs-Diagramme ermitteln, wobei zweckmäßig von einer Betonzugfestigkeit $\beta_{bz} = 0$ ausgegangen wird. In solchen Diagrammen entspricht dem ungerissenen Zustand eine vergleichsweise steile Gerade, während dem gerissenen Zustand eine schwach gekrümmte, wesentlich flacher verlaufende Linie zugeordnet ist; die beiden Äste des Diagramms werden durch einen stark gekrümmten Übergangsbereich verbunden. Der wesentlichste Parameter solcher Diagramme ist bei sonst gleichen geometrischen Bedingungen - Querschnitt, Spanngliedlage usw. - die Spannbettspannung der Spannglieder, oder anders ausgedrückt, der Vorspanngrad, wodurch ein größerer oder kleinerer ungerissener Bereich bestimmt wird (Bild 3):

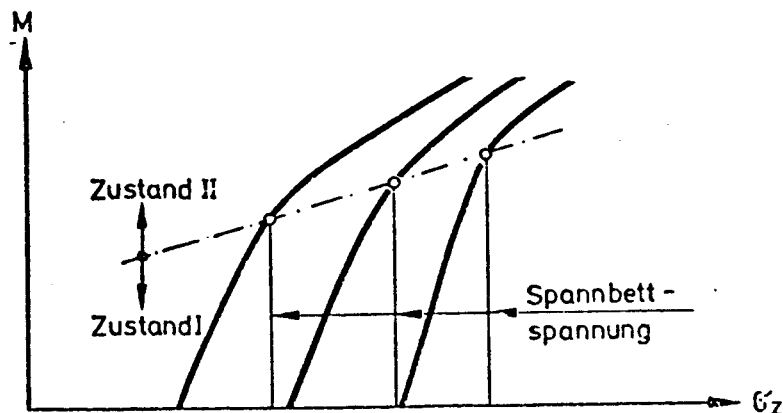


Bild 3

Aus solchen Diagrammen lassen sich die Spannungsänderungen im Spannstahl unter Wechselbeanspruchungen $\Delta M = M^+ - M^-$ in Kenntnis des im Querschnitt vorhandenen Grundmoments M_0 - Eigengewicht + Vorspannung + sonstige ständige Einwirkungen - einfach ermitteln (Bild 4) :

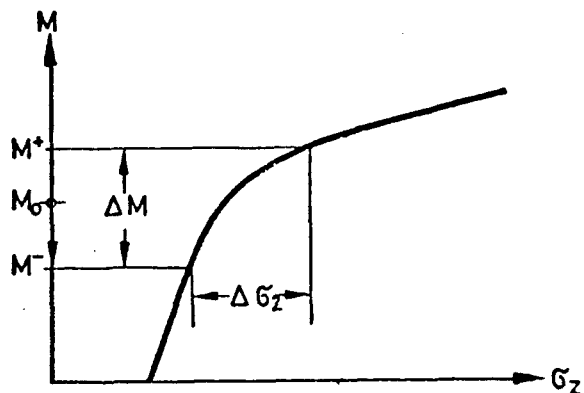


Bild 4

Aus Bild 4 ist zu erkennen, daß die Spannungsänderung im Spannstahl, $\Delta \sigma_z$, sehr stark davon beeinflusst wird, in welchem Bereich M_0 liegt: z.B. verursachen verhältnismäßig große Wechselbeanspruchungen ΔM nur geringe Spannungsänderungen $\Delta \sigma_z$, sofern der Querschnitt infolge der eingetretenen Momentenänderungen zumindest überwiegend im ungerissenen Zustand verbleibt.

Für die durch Messungen überprüften Koppelquerschnitte d, e und f wurden entsprechende $M-\sigma_z$ -Diagramme bereits in der gutachtlichen Stellungnahme zum Bauwerk (vgl. Abschnitt 1) ermittelt; sie sind in Anlage 23, 24 und 25 wiedergegeben. Außer den zum planmäßigen Vorspannzustand gehörenden Kurven wurden stets zwei weitere angegeben, die dem "90" bzw. "80%" -igem Vorspannzustand entsprechen. Bei diesen Abminderungen wurde ohne nähere Untersuchungen

- lediglich um die Empfindlichkeit der Annahmen zu zeigen - ein örtlicher Fehler im Vorspannzustand unterstellt, wobei die vorgenommene 10 bzw. 20%-ige Abminderung der Vorspannung nur auf den statisch bestimmten Anteil bezogen wurde. Auf diesem Wege könnte ein örtlicher Fehler, wie er u.a. als Folge eines vom Normalbereich abweichenden Kriech- und Schwindverhaltens der Koppelbereiche auftreten kann, berücksichtigt werden.

Nach DIN 1075 ist zur Ermittlung der für die Ermüdungsbeanspruchung maßgebenden Spannungsamplituden im Schlaff- wie im Spannstahl von 50% der Verkehrslasten nach DIN 1072 auszugehen. Der Bereich der Wechselbeanspruchungen erstreckt sich demnach von $M_o - M_{-p/2}$ bis $M_o + M_{+p/2}$. Die Größe M_o wurde in der gutachtlichen Stellungnahme in Anlehnung an den Änderungsbescheid zu den Zulassungen aller Spannverfahren vom 08.02.1977 unter Einbeziehung eines Biegemoments infolge eines Temperaturunterschieds zwischen Ober- und Unterseite des Querschnitts von 10 K angesetzt. Ohne diese Temperaturmomente befinden sich rechnerisch alle Koppelquerschnitte - entsprechend den Spannbetonrichtlinien - auch unter Hinzuziehung der Beanspruchungen infolge halber Verkehrslast im ungerissenen Zustand (Randspannungen ≤ 0).

Die Untersuchungsergebnisse der gutachtlichen Stellungnahme für die hier betrachteten Koppelquerschnitte d, e und f unter den beschriebenen Annahmen der o.g. Änderungsbescheide enthält nachstehende Tabelle:

Vorspanngrad		planmäßige Vorspannung	unterstellte örtliche Abminderung der Vor- spannung von	
rechnerisch $\Delta\sigma_{z,+p/2}$ [kp/cm ²] in der untersten Spanngliedlage	in Koppelfuge f		10%	20%
	in Koppelfuge e	79	152	383
	in Koppelfuge d	136	306	685
	zul $\Delta\sigma_{z,+p/2}$ [kp/cm ²]		552	

Hieraus ist zu entnehmen, daß die Spannungsänderungen im Spannstahl der untersten Spanngliedlage im planmäßigen Vorspannzustand - auch bei einer Erhöhung des Grundmoments um den Anteil eines zum 10 K- Temperaturunterschied gehörenden Zwangmoments - in jedem Koppelquerschnitt weit unter dem zum Spannverfahren Polensky & Zöllner gehörenden zulässigen Wert von $\Delta\sigma_z = 800/1,45 = 552 \text{ kp/cm}^2$ liegen. Überschreitungen dieses Wertes ergeben sich erst bei größeren Abweichungen vom planmäßigen Vorspannzustand der Koppelbereiche. Die größten Spannungsänderungen ergeben sich im Koppelquerschnitt f. Aus diesem Grunde wurde die im Abschnitt 2 beschriebene Meßeinrichtung auf diese Koppelfuge konzentriert.

7.2. Tragverhalten der untersuchten Koppelfugen aufgrund der Messungen

Die aus den in Abschnitt 6.2. im einzelnen erörterten, unter den in Abschnitt 3.2. beschriebenen Laststellungen erzielten Spannungsänderungen der Spannstähle in den Koppelbereichen lassen sich in die unter halber Verkehrslast zu erwartenden Spannungsänderungen umrechnen:

$$\Delta\sigma_{+p/2} = \Delta\sigma_{\text{Probebelastung}} \cdot \frac{\Delta M_{+p/2}}{\Delta M_{\text{Probebelastung}}}$$

Es wurde während der Probebelastung eine größere Anzahl von Laststellungen verwirklicht, aus welchen eine größere Anzahl von Wertepaaren $\Delta M_{\text{Probebelastung}} - \Delta\sigma_{\text{Probebelastung}}$ gebildet werden könnten. Da die Meßwerte nur zum Teil aus Hauptlaststellungen stammen und die $\Delta M - \Delta\sigma_z$ -Zusammenhänge (vgl. die

Anlagen 17 - 19) nichtlinear sind, würden größere Extrapolationen, d.h. Hochrechnungen des gesuchten Wertes $\Delta\sigma_{z, \pm p/2}$ aus kleinen gemessenen Spannungsänderungen, mit erheblichen Unsicherheiten verbunden sein. Aus diesem Grunde wurden in der nachstehenden Tabelle Spannungsänderungen $\Delta\sigma_{z, \pm p/2}$ nicht rechnerisch, d.h. unter Zugrundelegung eines linearisierten Zusammenhangs $\Delta M - \Delta\sigma_z$ ermittelt, sondern direkt aus den in den Anlagen 17 - 19 dargestellten gemessenen Zusammenhängen durch Auftragen von $M_{+p/2}$ und $M_{-p/2}$ abgegriffen.

gemessen $\Delta\sigma_{z, \pm p/2}$ [kp/cm ²] in der untersten Spanngliedlage	in Koppelfuge f (Mittelwert Meßstr.1u.2)	310
	in Koppelfuge e (Meßstelle 3)	340
	in Koppelfuge d (Meßstelle 4)	550
zul $\Delta\sigma_{z, \pm p/2}$ [kp/cm ²]		552

Abweichend von den rechnerischen Untersuchungen ergaben die Messungen die größten Spannungsänderungen unter einer der halben Verkehrslast entsprechenden Belastung in der Koppelfuge d; die experimentell ermittelten Werte liegen hier nahe dem zulässigen Wert. Hingegen zeigt die rechnerisch am ungünstigsten zu bewertende Fuge f experimentell festgestellte Spannungsamplituden in beiden Stegen, die deutlich unter dem zulässigen Wert liegen.

7.3. Diskussion der Ergebnisse

Die in den Anlagen 17 - 19 dargestellten, aus vielen Einzelmessungen gewonnenen $\Delta M - \Delta \sigma_z$ -Diagramme der Koppelquerschnitte d, e und f sind als Ausschnitte aus den in Abschnitt 7.1. näher erläuterten $M - \sigma_z$ -Linien (vgl. Anlage 24 - 26) anzusehen. Zum besseren Vergleich der rechnerisch und experimentell gewonnenen Kurven wurden diese für die untersuchten Koppelquerschnitte in den Anlagen 27 - 29 jeweils nach Querschnitten geordnet in einem Bild dargestellt. Ein weitergehender, direkter Vergleich beider Linien wird durch eine Anzahl von Unsicherheitsfaktoren erschwert:

- Der Vorspannzustand der Brücke kann nur geschätzt werden. Es ist weder bekannt, ob der planmäßige Vorspannzustand mit nur geringer Schwankung bei der Herstellung des Bauwerks tatsächlich erreicht wurde, noch sind seither eingetretene, auch unter Beachtung der Besonderheiten des Koppelankers als verlässlich zu betrachtende Kriechverluste bekannt.
- Die Auswirkungen des Herstellungsverfahrens können nachträglich nur geschätzt werden. Fest steht lediglich, daß die Bodenplatte des Hohlkastens praktisch in allen Koppelquerschnitten stark aufgerissen ist (vgl. Anlage 2), was u.U. bereits als eine unmittelbare Folge des Vorspannens bei abschnittsweise hergestellten

Brücken - "Mehlhorn Effekt", nichtlineare Spannungsverteilung im Bereiche von Koppelquerschnitten unmittelbar nach Herstellung - betrachtet werden kann. Trifft diese Annahme zu, so liegt in allen Koppelbereichen seit längerer Zeit annähernd ein Plattenbalkenquerschnitt statt eines Hohlkastens vor, da die unter der halben Verkehrslast gemessenen Rißbreitenänderungen allein nicht ausreichen, um die Risse der Bodenplatte in Brückenachse bei negativen Momenten zu schließen. Die Bodenplatte kann demnach auch keine Druckspannungen übertragen.

Das $M-\sigma_z$ -Diagramm der unteren Spanngliedlage eines Plattenbalkens, der aus einem Hohlkasten durch Aufreißen des Querschnitts bis zu dieser Spanngliedlage entsteht, erhält man näherungsweise aus jenem eines Hohlkastens, indem man sich die entsprechende Kurve unterhalb der Spannbettspannung tangentiell fortgesetzt denkt (Bild 5).

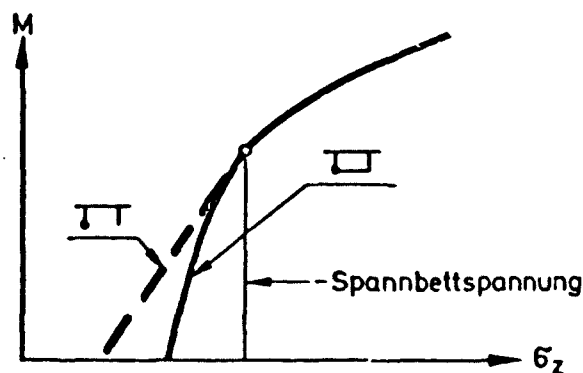


Bild 5

Die Neigung des dem Zustand I entsprechenden Asts ist hierbei erheblich flacher, da das Widerstandsmoment des zugehörigen Plattenbalkens deutlich kleiner als das des ursprünglichen Hohlkastens ist.

- Die genaue Auswirkung der beschriebenen Querschnittsschwächung - insbesondere im Hinblick auf das Kriechverhalten des Tragwerks - ist nicht bekannt. Es ist lediglich anzunehmen, daß die höheren Stegdruckspannungen eines Plattenbalkens auch höhere Spannkraftverluste infolge Kriechen verursachen.
- Der momentane Beanspruchungszustand der Brücke aus Zwang infolge Temperatur kann zwar aus den Messungen abgeschätzt werden - alle anderen Zwangbeanspruchungen (z.B. Stützensenkung, Kriechumlagerungen usw.) sind jedoch nicht bekannt. Mithin ist festzustellen, daß das Grundmoment der Koppelquerschnitte nur als grober Schätzwert bekannt ist.
- $M-\sigma_z$ -Diagramme werden aufgrund einer Querschnittsanalyse eines Balkentragwerkes im ungerissenen bzw. gerissenen Zustand ermittelt. Aufgrund der beschriebenen Beobachtungen - gerissene Bodenplatte in den Koppelquerschnitten - ist jedoch davon auszugehen, daß diese Annahmen bereits im Zustand I nicht zutreffen, da die Koppelbereiche weder als Plattenbalken noch als Hohlkasten vereinfacht werden dürfen. Vielmehr müßte hierbei der tatsächliche Scheibenspannungszustand im unmittelbaren Koppelfugenbereich näher untersucht werden.

Die Querschnittsanalyse im gerissenen Zustand geht ferner von der Annahme aus, daß es sich um ge-

rissene Bereiche handelt, die sich auf das mehrfache der Querschnittshöhe entlang der Balkenachse erstrecken. In Wirklichkeit handelt es sich beim betrachteten Bauwerks stets um Einzelrisse direkt in den Koppelquerschnitten, die dementsprechend durch größere Verbundstörungen in Fugennähe begleitet sind und daher eher als "Federgelenke" aufgefaßt werden könnten.

Unter Beachtung der hier im einzelnen erörterten Vorbehalte ergibt sich ein Vergleich der rechnerischen $M-\sigma_z$ - mit den gemessenen $\Delta M-\Delta \sigma_z$ -Kurven, daß sich alle 3 Koppelquerschnitte etwa ähnlich verhalten, indem sie in den Messungen eine größere Steifigkeit für entlastende negative Momente (Schließen der Fugen) und eine geringere Steifigkeit für belastende positive Momente (Vergrößerung der Risse) zeigen. Die Entlastungskurve ist allerdings wesentlich flacher als sie sich rechnerisch für den Zustand I des entsprechenden Hohlkastenquerschnitts ergibt; sie entspricht in etwa der Steifigkeit eines aus dem Hohlkasten beim Aufreißen des Querschnitts bis zur unteren Spanngliedlage entstehenden Plattenbalkens. Die Belastungskurve ist erheblich steiler als der dem Zustand II rechnerisch entsprechende Kurvenast, obwohl die Vergrößerung der Rißbreiten während der Probelastung in der Größenordnung von 0,1 mm lag, d.h. daß sich die beobachteten Querschnitte deutlich im gerissenen Zustand befanden.

8. Zusammenfassung

Zur Überprüfung des Erhaltungszustands der Krähwinkler Brücke im Zuge der L 412 wurden Probebelastungen und Verformungsmessungen im Bereiche der Koppelquerschnitte d, e und f durchgeführt. Der

Untersuchungstermin wurde bewußt so gewählt, daß mögliche Zwangbeanspruchungen aus unterschiedlicher Erwärmung der Ober- und Unterseite der Hohlkastenbrücke vernachlässigbar klein bleiben sollten.

Die die Untersuchungen begleitenden Temperaturmessungen ergaben, daß die erwähnten Temperaturunterschiede tatsächlich sehr gering blieben; sie betrugen während der Dauer der Messungen ca. $\pm 0,4$ K, bezogen auf die Schwerpunktlage des Querschnitts.

Die aus den Meßwerten abgeleiteten Spannungsänderungen des Spannstahls in der unteren Spanngliedlage blieben unter den vorgenannten Bedingungen unter Aufbringung von $p/2$ in den ungünstigsten Laststellungen stets unter dem für das vorhandene Spannverfahren zulässigen Wert von $\Delta\sigma_z = 800/1,45 = 552 \text{ kp/cm}^2$. Die Meßwerte, die in unmittelbarer Nähe der Koppelfugen erzielt wurden, stehen allerdings mit den rechnerisch für den planmäßigen Zustand der Brücke ohne Temperaturzwang ermittelten Spannungsschwankungen nicht im Einklang. Wie im Bericht eingehend diskutiert, läßt sich diese Diskrepanz vor allem auf zwei Gründe zurückführen:

- Das Grundmoment der Koppelquerschnitte - Eigengewicht + Vorspannung + Zwangmomente - ist nicht hinreichend genau bekannt.
- Gerissene Trägerbereiche in der Nähe der Koppelfugen lassen sich nur näherungsweise als Balkenquerschnitte idealisieren.

Trotz dieser Umstände sind die gemessenen Momenten-Spannungsänderungs-Zusammenhänge als repräsentativ

für die untersuchten Koppelquerschnitte zu betrachten und als solche zur Beurteilung des Erhaltungszustands des Bauwerks heranzuziehen.

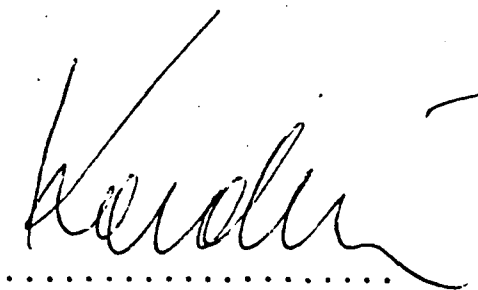
Die vorgenannten Messungen stellen nur den ersten Teil der geplanten Untersuchungen dar:

Eine Wiederholung der gleichen Belastungsvorgänge bei sommerlichen Witterungsverhältnissen mit größtmöglichen Temperaturzwangbeanspruchungen soll den oberen Grenzwert der zu erwartenden spannungsänderungen abzuschätzen erlauben. Hierbei müssen größere Amplitudenwerte erwartet werden, jedoch ist auch bei einer deutlichen Erhöhung des Grundmoments M_0 nicht solch eine sprunghafte Vergrößerung der bisherigen Spannungsänderungen zu erwarten, wie sich dies aus den rechnerischen Zusammenhängen ergeben würde, da sich die Querschnitte nach vorliegenden Erfahrungen im gerissenen Zustand steifer als rechnerisch nachweisbar verhalten.

Die im Ankerbereich der Koppelfuge f durchgeführten Messungen wurden durch Dehnungsmessungen am Spannstahl in größerer Entfernung von der Fuge in der Nähe der in Zulassungsversuchen als bruchgefährdet erkannten Bereiche ergänzt. Diese Meßergebnisse erlauben den Schluß, daß hier bereits ein ungestörter Verbundzustand herrschte, da die Spannungsschwankungen erheblich unter den in unmittelbarer Fugennähe gemessenen Werten liegen. Hieraus folgt, daß zur Beurteilung der eigentlichen Sicherheit der Spanngliedverankerungen in den Koppelbereichen bekannt sein müßte, unter welchen Umständen der Verbund auf solchen Längen zerstört wird, daß auch die eigentlich bruchgefährdeten Querschnitte in etwa den gleichen Spannungs-

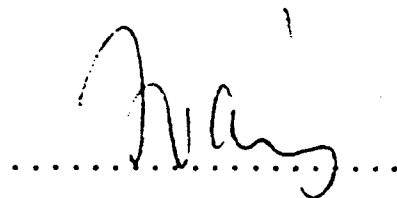
änderungen ausgesetzt werden, wie die in den Fugen ermittelten. Solche Untersuchungen sind bisher nicht bekannt.

Unter den gegebenen Umständen kann zusammenfassend festgestellt werden, daß das untersuchte Bauwerk derzeit im Hinblick seiner Standsicherheit nicht sanierungsbedürftig ist. Nach vorsichtigen Schätzungen sind auch für den Fall höchster Zwangbeanspruchungen keine so großen Spannungsänderungen zu erwarten, daß eine Verstärkung des Bauwerks erforderlich wird. Es ist allerdings zu empfehlen, zur Herstellung des Korrosionsschutzes der Spannstähle die gerissenen Bereiche nach Abschluß des zweiten Teils der Messungen mit Kunstharz zu verpressen.



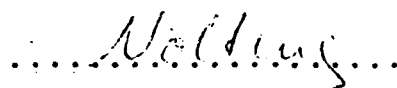
.....
(Kordina)

o.Prof. Dr.-Ing.



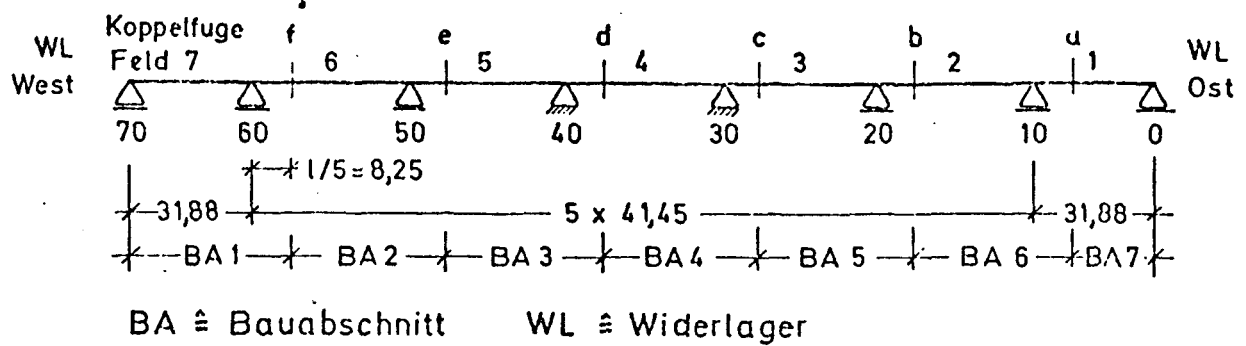
.....
(Iványi)

Dr.-Ing.



.....
(Nölting)

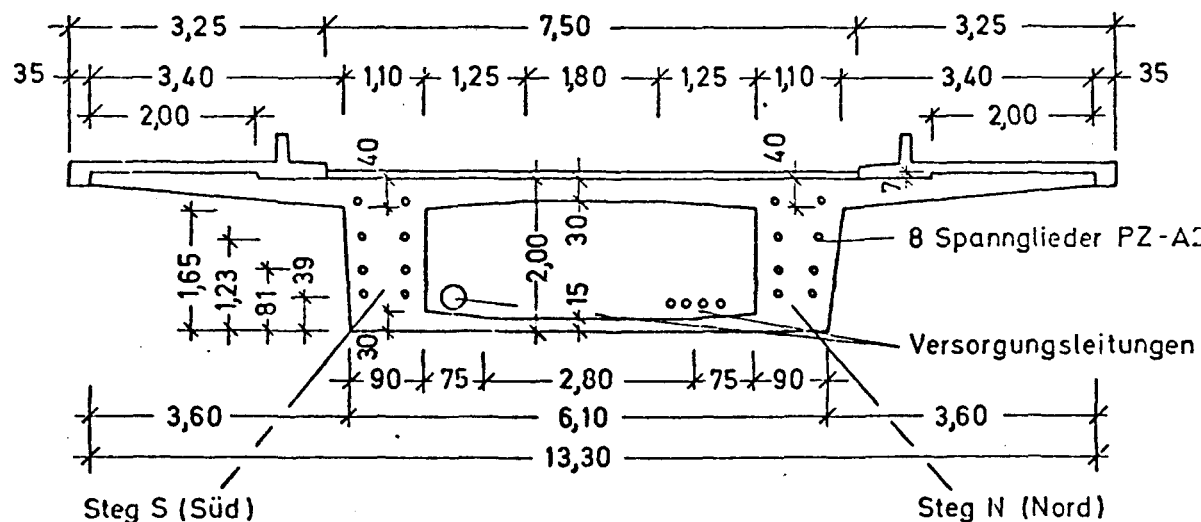
Dipl.-Ing.

Statisches SystemBezeichnung der Schnitte:

0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 $\hat{=}$ 1/10 Punkte Feld 1
 ...
 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70 = 1/10 Punkte Feld 7

Koppelfugen: a, b, c, d, e, f

Zwischenpunkte: z.B. 59,5 zwischen 59 und 60

Querschnitt im Bereich der Koppelfugen:

Beton:

B 450

$$F_b = 8,42 \text{ m}^2$$

$$y_{bu} = 1,30 \text{ m}$$

$$J_b = 3,90 \text{ m}^4$$

Spannstahl:

PZ - A200

St 145/160

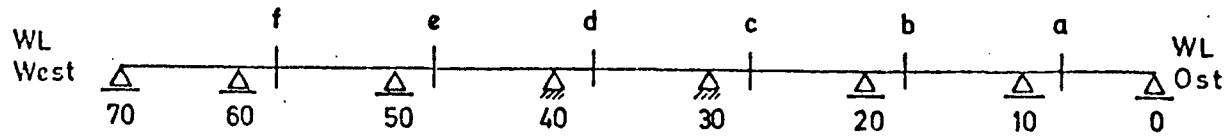
$$F_z = 24,0 \text{ cm}^2$$

$$\text{zul. } Z = 211 \text{ Mp}$$

Betonstahl:

BSt 42/50

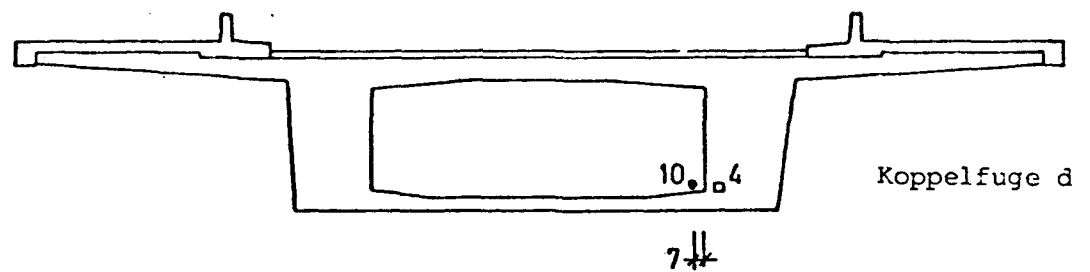
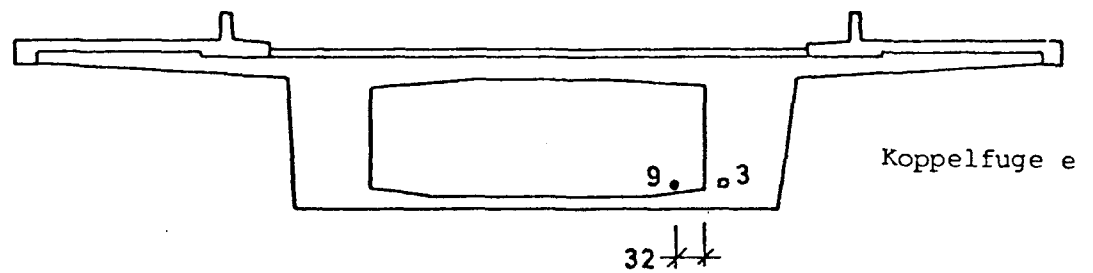
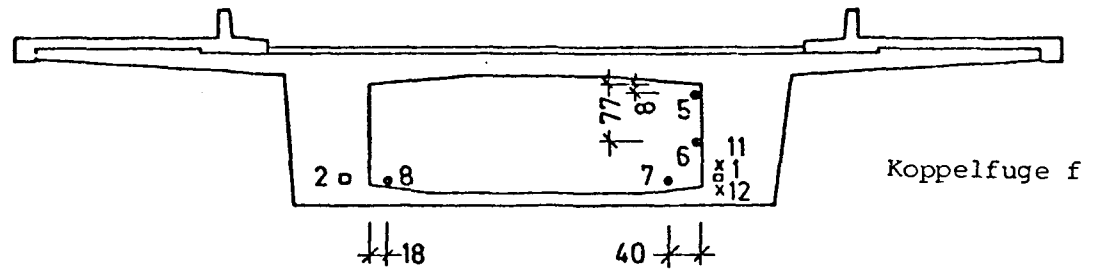
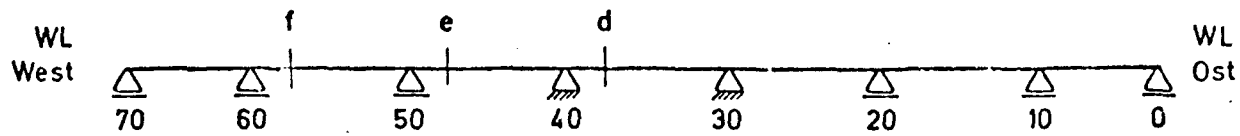
System und Querschnitt



Rißbreiten in μm (gemessen mit Rißlupe)

Meßstelle Koppelfuge	1	2	3	4	5	6	7
a	—	< 100	< 100	500	< 100	< 100	—
b	—	—	500	1000	800	< 100	< 100
c	—	< 100	800	500	300	< 100	—
d	—	< 100	400	1200	400	< 100	—
e	—	—	< 100	800	500	< 100	—
f	—	< 100	400	1000	300	< 100	—

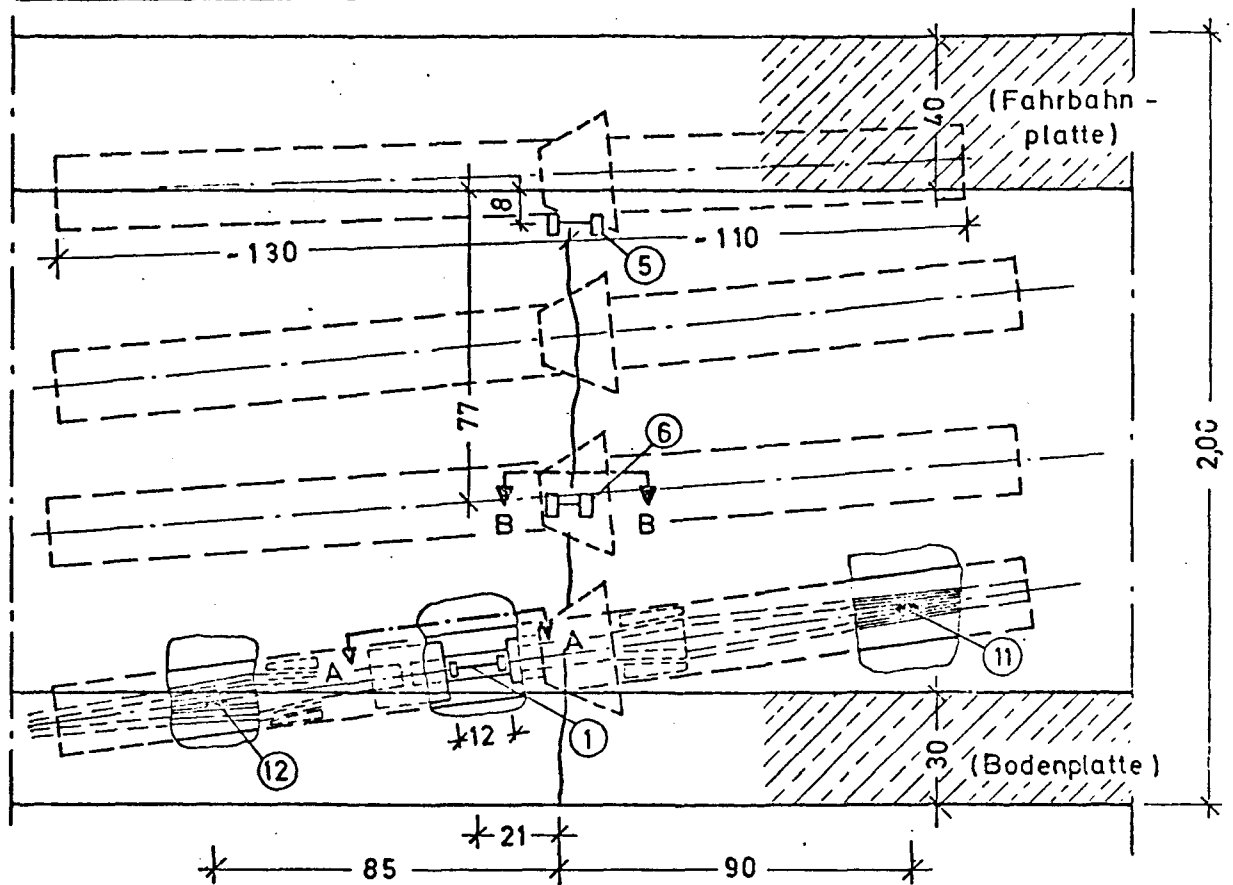
Rißbreiten



- Ankerdehnungsmeßstellen 1 bis 4
- Rißbreitenmeßstellen 5 bis 10
- × Spannstahldehnungsmeßstellen 11 und 12

Lage der Meßstellen zur Messung der
Dehnungs - und Rißbreitenänderungen

Innenansicht des Steges

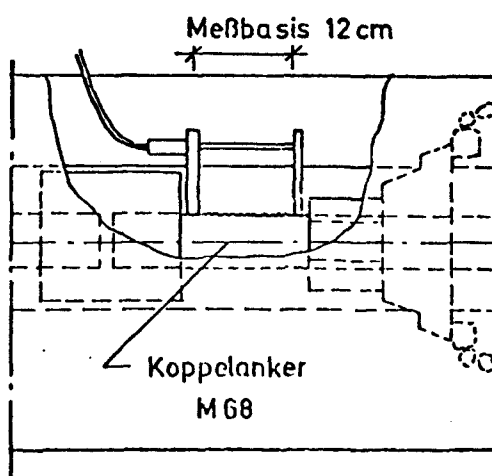


(zug. Foto s. Anlage 5)

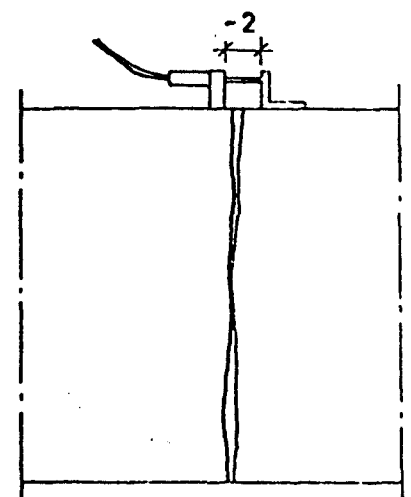
Alle Maße in cm

Schnitt A - A

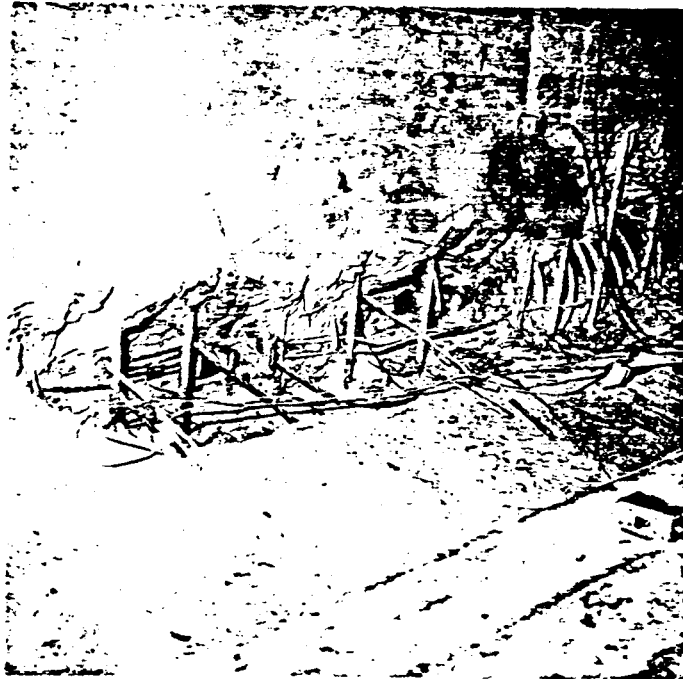
(Maßstab vergrößert)



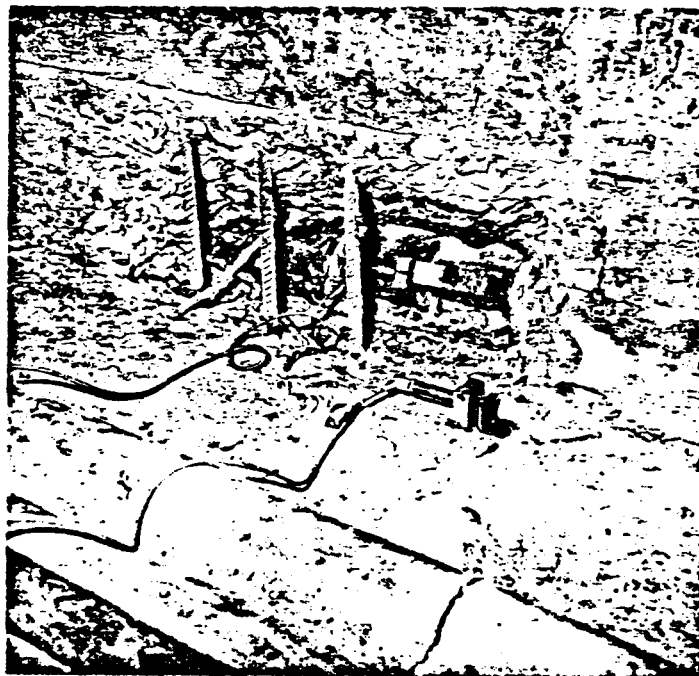
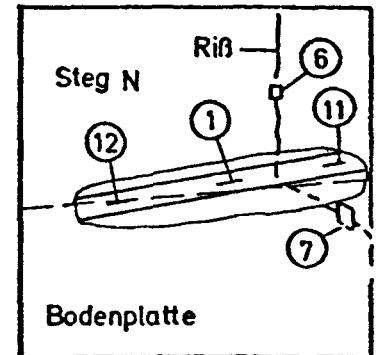
Schnitt B - B



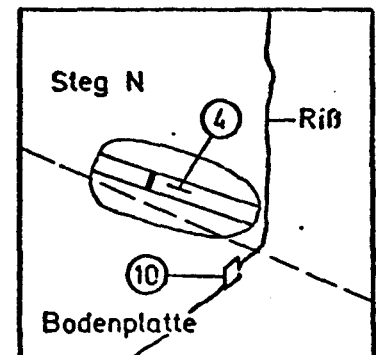
Meßstellen am Steg N im Bereich der Koppelfuge f

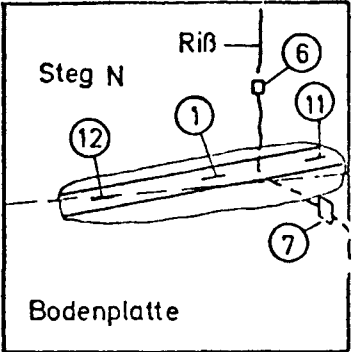
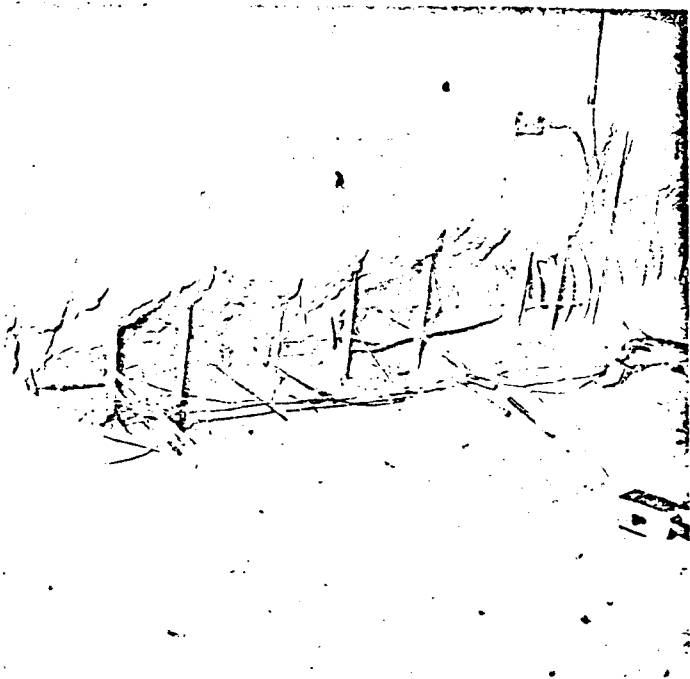


Meßstellen am Steg N im Bereich
der Koppelfuge f

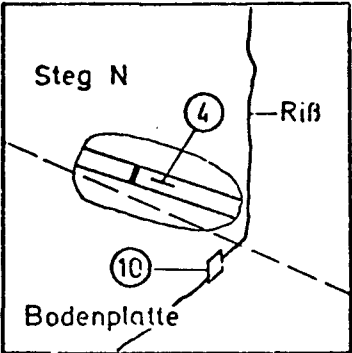
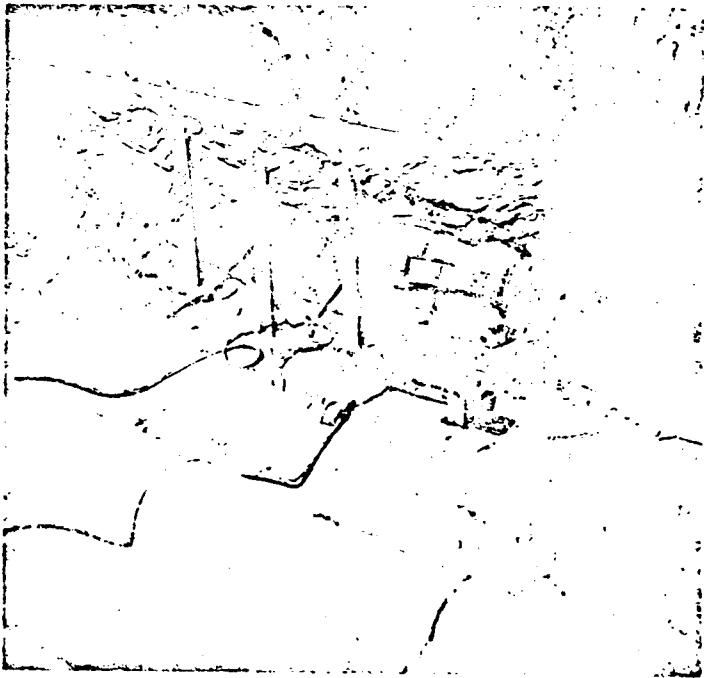


Meßstellen am Steg N im Bereich
der Koppelfuge d

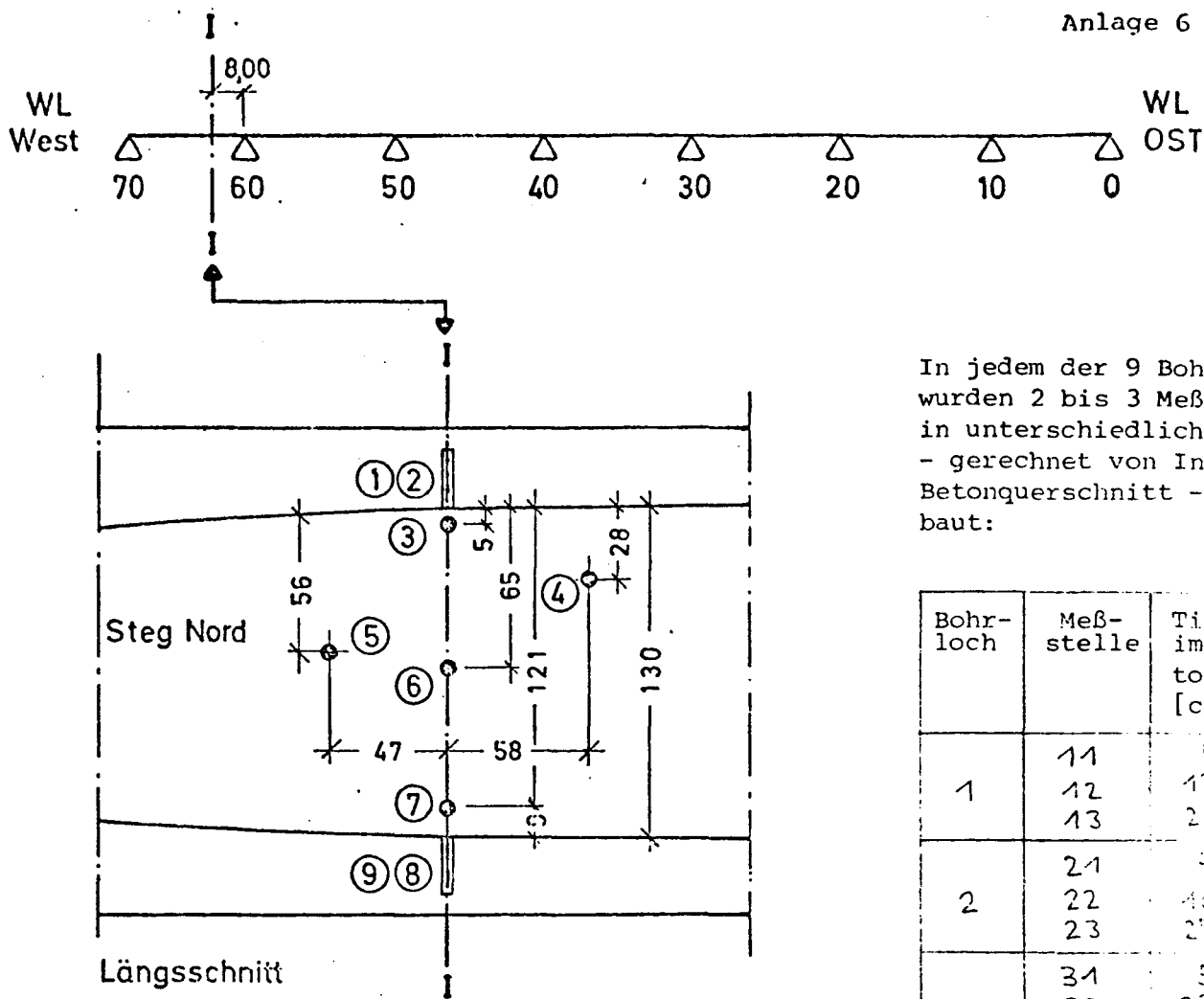




Meßstellen am Steg N im Bereich
der Koppelfuge f



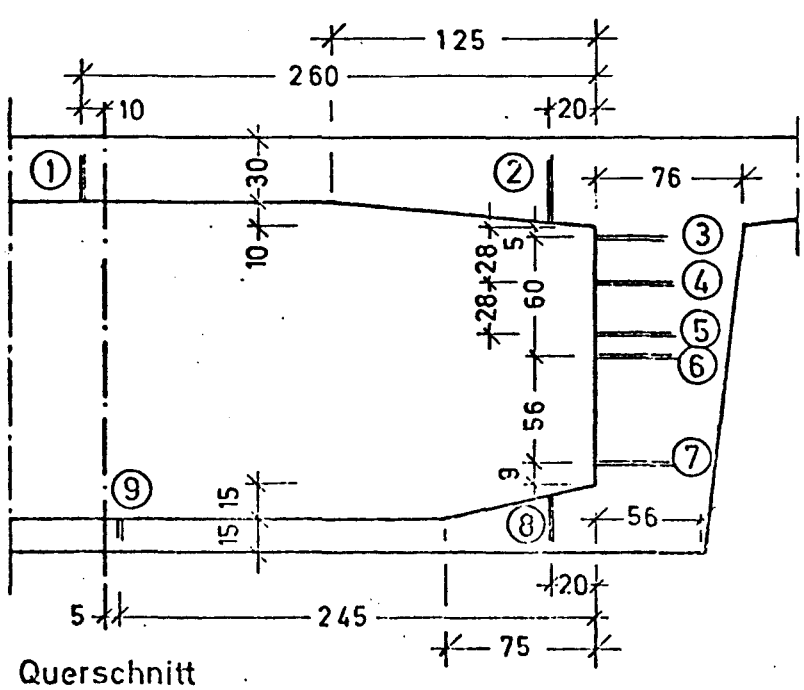
Meßstellen am Steg N im Bereich
der Koppelfuge d



In jedem der 9 Bohrlöcher wurden 2 bis 3 Meßstellen in unterschiedlichen Tiefen - gerechnet von Innenkante Betonquerschnitt - eingebaut:

Bohrloch	Meßstelle	Tiefe im Beton [cm]
1	11	4
	12	12
	13	22
2	21	5
	22	40
	23	22
3	31	5
	32	22
	33	56
4	41	2
	42	54
5	51	30
	52	33
6	61	5
	62	25
	63	52
7	71	6
	72	27
	73	30
8	81	4
	82	9
	83	23
9	91	5
	92	12

Alle Maße in cm

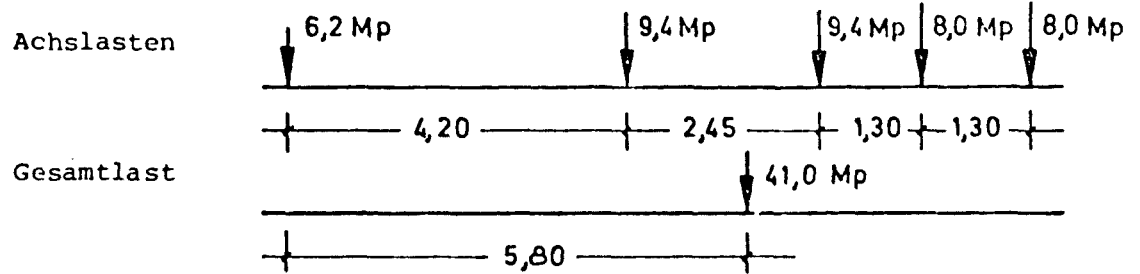


Lage der Temperaturmeßstellen

Achsabstände und Achslasten der Belastungsfahrzeuge:

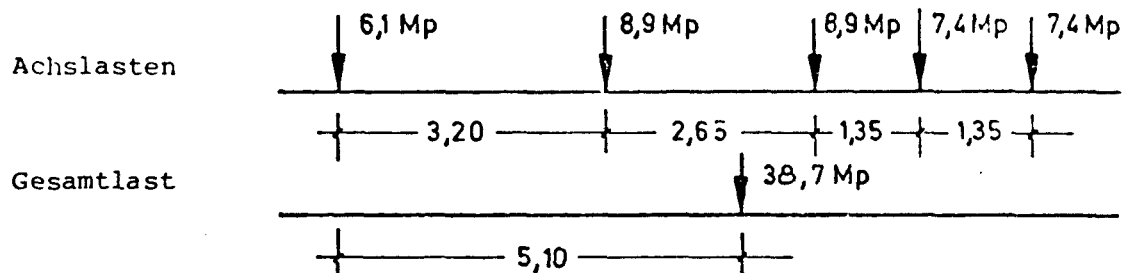
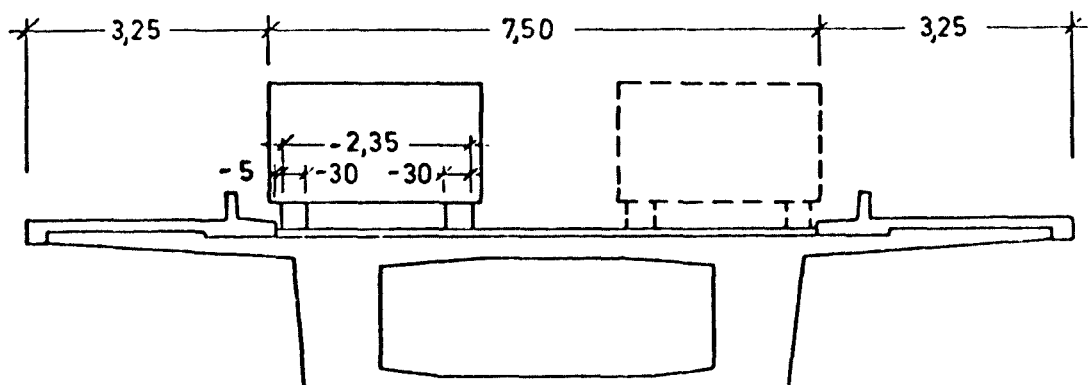
Fahrzeugtyp S:

← Fahrtrichtung →



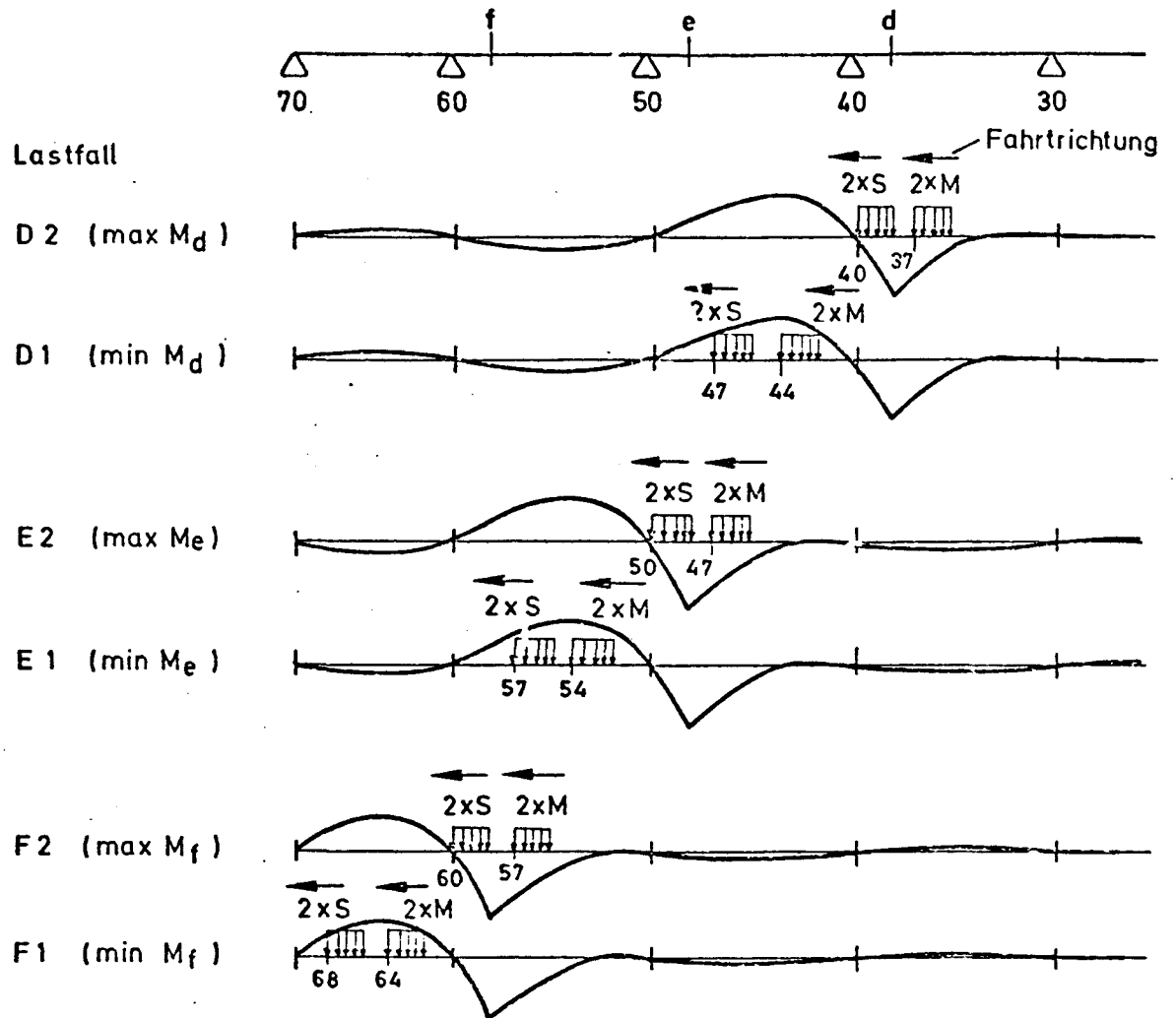
Fahrzeugtyp M:

← Fahrtrichtung →

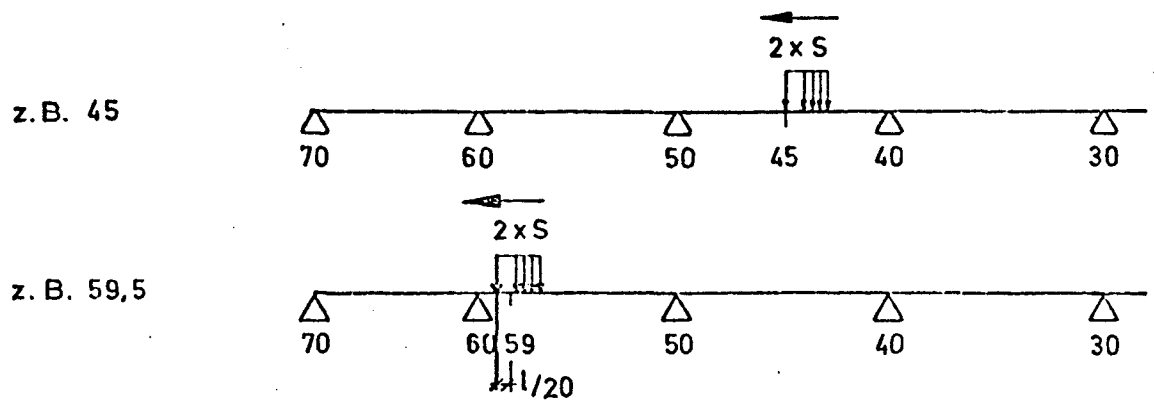
Lastanordnungen im Querschnitt:

Belastungsfahrzeuge und Lastanordnung

Laststellungen mit 4 Fahrzeugen:



Laststellungen mit 2 Fahrzeugen:



Laststellungen

Meß- ergebnis	Laststellung (LS)			F1	F2	E1	E2	D1	D2
	Meßstelle			(min M_f)	(max M_f)	(min M_e)	(max M_e)	(min M_d)	(max M_d)
	Koppel- fuge	Steg	Meß- stelle Nr.	Meßergebnisse: 1. Zeile: 1. Messung (11.10 Uhr) 2. Zeile: 2. Messung (13.00 Uhr) 3. Zeile: Mittelwert					
Ankerdeh- nungsände- rung $\Delta \epsilon_A$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	f	N	1	- 46	+ 140	+ 24	+ 7	+ 7	+ 5
				- 55	+ 144	+ 23	+ 3	+ 3	+ 1
				- 51	+ 142	+ 24	+ 5	+ 5	+ 3
		S	2	- 70	+ 105	+ 35	+ 4	+ 4	+ 4
				- 66	+ 113	+ 38	+ 12	+ 8	+ 4
				- 68	+ 109	+ 37	+ 8	+ 6	+ 4
	e	N	3	+ 22	- 46	- 63	+ 107	+ 34	+ 2
				+ 25	- 44	- 63	+ 112	+ 36	+ 3
	d	N	4	+ 24	- 45	- 63	+ 110	+ 35	+ 3
				± 0	+ 27	+ 39	- 70	- 90	+ 175
	f	N	5	± 0	+ 27	+ 39	- 70	- 94	+ 175
				± 0	+ 27	+ 39	- 70	- 92	+ 177
				± 0	+ 27	+ 39	- 70	- 92	+ 177
			6	+ 0,1	$\pm 0,0$	± 0	± 0	± 0	± 0
				- 0,1	- 0,1	± 0	± 0	± 0	± 0
				± 0	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0
		S	7	- 8	+ 19	+ 3	+ 2	+ 1	± 0
				- 8	+ 21	+ 4	+ 2	+ 1	+ 1
				- 8	+ 20	+ 4	+ 2	+ 1	± 0
			8	- 22	+ 59	+ 24	+ 6	+ 4	+ 3
				- 23	+ 57	+ 23	+ 3	+ 3	+ 1
				- 26	+ 56	+ 24	+ 5	+ 4	+ 2
Rißbreiten- änderung Δ_w [μm]	e	N	9	- 36	+ 82	+ 18	+ 6	+ 6	+ 3
				- 41	+ 83	+ 17	+ 6	+ 3	+ 1
				- 38	+ 82	+ 18	+ 6	+ 5	+ 2
			10	+ 15	- 28	- 31	+ 57	+ 18	- 2
				+ 14	- 32	- 39	+ 59	+ 18	+ 1
				+ 15	- 30	- 35	+ 58	+ 18	- 1
Spannstahl- dehnungsän- derung $\Delta \epsilon_z$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	f	N	11	+ 8	+ 24	+ 32	- 14	- 17	+ 88
				+ 1	+ 19	+ 27	- 24	- 27	+ 87
			12	+ 5	+ 22	+ 30	- 19	- 22	+ 87
				- 18	+ 18	± 0	± 0	± 0	± 0
Spannstahl- dehnungsän- derung $\Delta \epsilon_z$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	f	N	12	- 26	+ 33	+ 13	± 0	± 0	± 0
				- 26	+ 33	+ 13	± 0	± 0	± 0

Meßergebnisse bei Belastungen mit 4 Fahrzeugen
für max M und min M in den Koppelfugen

Meß- ergebnis	Laststellung (LS)			F1S/F1N	F2S/F2N	E1S/E1N	E2S/E2N	D1S/D1N	D2S/D2N
	Meßstelle			(minM _f)	(maxM _f)	(minM _e)	(maxM _e)	(minM _d)	(maxM _d)
	Koppel- fuge	Steg	Meß- stelle Nr.	Meßergebnisse: 1. Zeile: südl. Steg belastet 2. Zeile: nördl. Steg belastet 3. Zeile: Summe					
Ankerdeh- nungsände- rung $\Delta \epsilon_A$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	f	N	1	- 23	+ 42	+ 13	+ 6	+ 7	+ 5
				- 28	+ 63	+ 16	+ 7	+ 7	+ 6
				- 51	+ 105	+ 29	+ 13	+ 14	+ 11
		S	2	- 35	+ 78	+ 31	+ 4	+ 4	+ 0
				- 31	+ 35	+ 12	+ 4	+ 4	+ 4
				- 66	+ 113	+ 43	+ 8	+ 4	+ 4
	e	N	3	+ 9	- 27	- 40	+ 35	+ 13	+ 0
				+ 11	- 25	- 36	+ 57	+ 20	+ 2
	d	N	4	+ 20	- 52	- 76	+ 92	+ 33	+ 2
				+ 0	+ 11	+ 16	- 39	- 54	+ 50
				+ 0	+ 11	+ 19	- 39	- 54	+ 93
				+ 0	+ 22	+ 35	- 78	- 108	+ 143
Rißbreiten- änderung $\Delta \epsilon_w$ [μm]	f	N	5	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0
				+ 0	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0
				+ 0	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0	+ 0
			6	- 4	+ 7	+ 3	+ 1	+ 1	+ 1
				- 4	+ 9	+ 1	+ 1	+ 1	+ 1
				- 8	+ 16	+ 4	+ 2	+ 2	+ 2
		S	7	- 17	+ 36	+ 13	+ 4	+ 4	+ 3
				- 19	+ 43	+ 15	+ 3	+ 3	+ 3
				- 36	+ 79	+ 28	+ 7	+ 7	+ 6
			8	- 21	+ 40	+ 7	+ 4	+ 5	+ 3
				- 16	+ 30	+ 14	+ 5	+ 4	+ 3
				- 37	+ 70	+ 21	+ 9	+ 9	+ 6
	e	N	9	+ 6	- 19	- 27	+ 25	+ 8	+ 1
				+ 6	- 18	- 26	+ 34	+ 8	+ 1
				+ 12	- 37	- 53	+ 59	+ 16	+ 2
	d	N	10	+ 0	+ 8	+ 11	- 18	- 22	+ 32
				- 1	+ 7	+ 11	- 18	- 22	+ 39
				- 1	+ 15	+ 22	- 36	- 44	+ 71
Spannstahl- dehnungsän- derung $\Delta \epsilon_z$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	f	N	11	- 7	+ 8	+ 3	+ 3	+ 3	+ 0
				- 8	+ 8	- 3	+ 0	+ 0	+ 3
				- 15	+ 16	+ 0	+ 3	+ 3	+ 3

Meßergebnisse bei Belastungen mit 2 Fahrzeugen hintereinander über dem südlichen und über dem nördlichen Steg

Meßergebnisse: Dehnungsänderungen $\Delta \epsilon$ [$\mu\text{m}/\text{m}$] bzw. Rißbreitenänderungen Δw [μm]

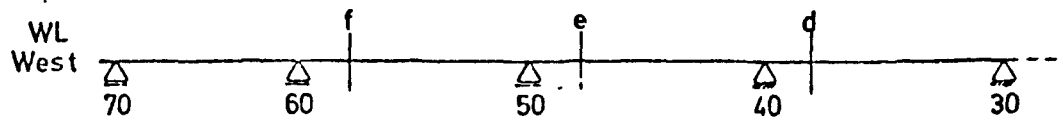
Meß- stelle Nr.	Laststellung										
	5	15	25	30	34	35	36	37	38	39	39,5
4	0	0	+ 1	\pm 0	+ 1	+ 8	+ 19	+ 42	+ 79	+ 115	+ 116
10	0	0	+ 1	+ 1	\pm 0	+ 2	+ 8	+ 18	+ 35	+ 50	+ 51
Rest	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Meß- stelle Nr.	Laststellung										
	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	49,5
3	0	0	0	0	+ 3	+ 3	+ 15	+ 31	+ 53	+ 69	+ 72
4	+ 101	+ 28	- 19	- 42	- 56	- 58	- 58	- 55	- 47	- 36	- 30
9	0	0	0	0	+ 1	+ 3	+ 7	+ 17	+ 30	+ 40	+ 41
10	+ 45	+ 15	- 6	- 14	- 16	- 17	- 17	- 16	- 15	- 12	- 11
Rest	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Meß- stelle Nr.	Laststellung										
	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	59,5
1	+ 4	+ 2	+ 1	\pm 0	+ 1	+ 3	+ 9	+ 23	+ 50	+ 80	+ 85
2	+ 4	+ 2	\pm 0	\pm 0	+ 4	+ 8	+ 12	+ 35	+ 62	+ 81	+ 86
3	+ 61	+ 18	- 11	- 29	- 38	- 41	- 41	- 36	- 32	- 23	- 19
4	- 24	- 11	- 1	+ 9	+ 13	+ 16	+ 15	+ 15	+ 12	+ 7	+ 6
5	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0
6	+ 1	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	+ 1	+ 3	+ 8	+ 12	+ 13
7	+ 2	+ 2	+ 1	+ 1	+ 1	+ 5	+ 10	+ 21	+ 41	+ 55	+ 56
8	+ 2	+ 1	\pm 0	- 1	\pm 0	+ 2	+ 6	+ 17	+ 35	+ 50	+ 54
9	+ 35	+ 12	- 8	- 19	- 23	- 25	- 25	- 24	- 22	- 17	- 15
10	- 9	- 4	+ 1	+ 5	+ 8	+ 10	+ 9	+ 9	+ 7	+ 5	+ 4
11	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	+ 3	+ 5	+ 8	+ 10	+ 12	+ 12

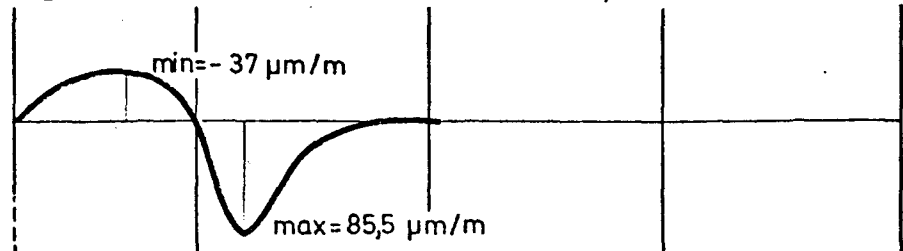
Meß- stelle Nr.	Laststellung										
	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
1	+ 176	+ 38	+ 5	- 15	- 27	- 32	- 35	- 35	- 33	- 28	- 22
2	+ 74	+ 35	\pm 0	- 23	- 31	- 39	- 39	- 39	- 35	- 27	- 23
3	- 14	- 7	\pm 0	+ 6	+ 8	+ 11	+ 11	+ 12	+ 11	+ 9	+ 7
4	+ 4	+ 3	+ 1	\pm 0	\pm 0	- 2	- 3	- 3	- 3	- 2	- 2
5	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0	\pm 0
6	+ 12	+ 6	+ 1	- 2	- 4	- 5	- 5	- 5	- 5	- 4	- 3
7	+ 51	+ 27	+ 4	- 10	- 16	- 17	- 18	- 18	- 18	- 17	- 14
8	+ 50	+ 30	+ 6	- 9	- 19	- 23	- 25	- 25	- 24	- 20	- 16
9	- 12	- 6	- 2	+ 3	+ 5	+ 6	+ 6	+ 7	+ 6	+ 5	+ 3
10	+ 3	+ 2	+ 1	\pm 0	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	- 1	\pm 0
11	+ 10	+ 5	\pm 0	\pm 0	- 5	- 8	- 10	- 9	- 8	- 5	- 3

Meßergebnisse bei Belastung mit 2 Fahrzeugen nebeneinander in den 1/10 Punkten der Brückenfelder

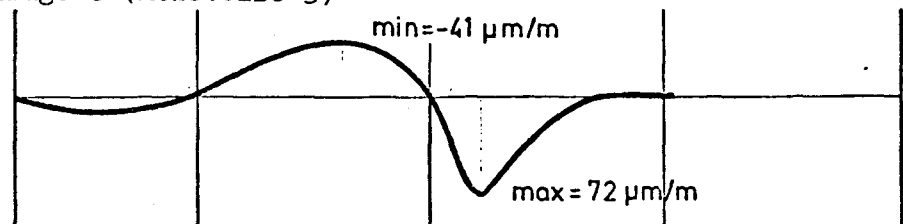


Dehnungsänderungen an den Koppelankern:

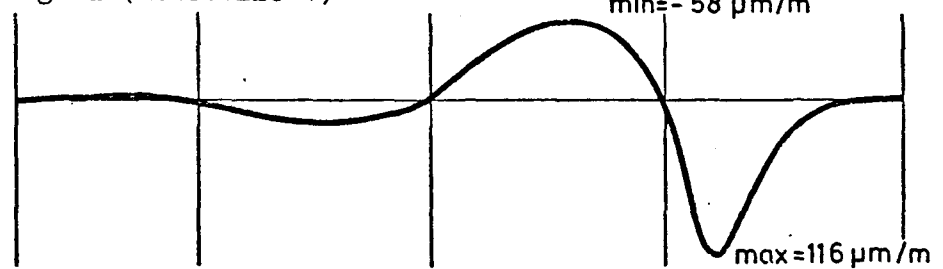
in Koppelfuge f (Mittelwert Meßstelle 1 und 2)



in Koppelfuge e (Meßstelle 3)

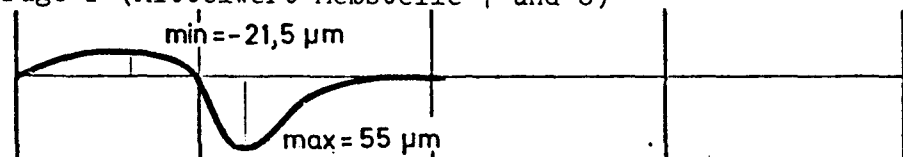


in Koppelfuge d (Meßstelle 4)

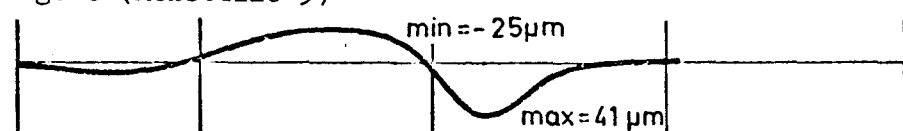


Rißbreitenänderungen in der Bodenplatte:

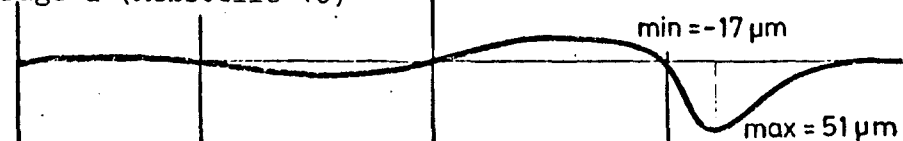
in Koppelfuge f (Mittelwert Meßstelle 7 und 8)



in Koppelfuge e (Meßstelle 9)



in Koppelfuge d (Meßstelle 10)



Meßergebnisse aus Anlage 11 entlang der Brückenachse aufgetr

Meß- ergebnis	Meß- stelle Nr.	definierte rollende Belastung								Zum Vergleich Extremwerte bei sta- tischer Be- lastung mit 1 Kfz.)**	
		Kfz-Typ S 50 km/h		Kfz-Typ M 60 km/h		Kfz-Typ S 70 km/h		Kfz-Typ M 75 km/h			
		max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
$\Delta \epsilon_A$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	1	+ 43	- 17	+ 44	- 16	+ 47	- 16	+ 38	- 16	+ 43	- 18
	2	+ 43	- 19	+ 46	- 19	+ 46	- 19	+ 35	- 19	+ 43	- 19
	3	+ 35	- 25	+ 42	- 25	+ 36	- 27	+ 36	- 25	+ 36	- 21
	4	+ 66	- 27	+ 66	- 27	+ 74	- 35	+ 58	- 27	+ 58	- 29
$\Delta \epsilon_w$ [μm]	5	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0
	6	+ 6	- 3	+ 6	- 3	+ 7	- 3	+ 6	- 3	+ 7	- 3
	7	+ 31	- 14	+ 32	- 13	+ 32	- 15	+ 26	- 16	+ 28	- 9
	8	+ 28	- 13	+ 28	- 13	+ 28	- 13	+ 25	- 13	+ 27	- 13
	9	+ 21	- 17	+ 24	- 17	+ 22	- 18	+ 23	- 15	+ 21	- 12
	10	+ 31	- 18	+ 30	- 16	+ 35	- 17	+ 29	- 17	+ 26	- 17
$\Delta \epsilon_z$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	12	+ 8	- 6	+ 8	- 6	+ 7	- 6	+ 6	- 3	-	-

)** Die Extremwerte der bei Belastung mit 2 Fahrzeugen gewonnenen Meßergebnisse aus Anlage 11 wurden durch 2 dividiert, um Vergleichswerte für die Belastung mit 1 Fahrzeug zu erhalten.

Meßergebnisse unter definierter rollender Belastung

Meß- ergebnis	Meß- stelle Nr.	Extreme Beanspruchungen unter fließendem Verkehr								Zum Vergleich Extremwerte bei Belastung mit 4 Kfz (Anlage 9)	
		12.23		13.22		14.20		15.01			
		max	min	max	min	max	min	max	min		
$\Delta \epsilon_A$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	1	+ 8	- 4	+ 6	- 6	+ 11	- 9	+ 8	- 5	+ 142	- 51
	2	+ 9	- 8	+ 8	- 7	+ 17	- 14	+ 6	- 5	+ 109	- 66
	3	+ 5	- 5	+ 9	- 5	+ 13	- 9	+ 8	- 5	+ 110	- 63
	4	+ 9	- 8	+ 8	- 7	+ 14	- 15	+ 13	- 9	+ 177	- 92
Δw [μm]	5	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0
	6	+ 1	± 0	+ 1	- 1	+ 2	- 2	+ 1	- 1	+ 20	- 8
	7	+ 5	- 3	+ 5	- 4	+ 3	- 7	+ 6	- 5	+ 56	- 26
	8	+ 7	- 3	+ 6	- 3	+ 8	- 8	+ 4	- 3	+ 83	- 38
	9	+ 4	- 4	+ 2	- 2	+ 7	- 7	+ 6	- 4	+ 58	- 35
	10	+ 6	- 3	+ 6	- 7	+ 8	- 9	+ 6	- 6	+ 87	- 22
$\Delta \epsilon_z$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	12	+ 5	- 3	+ 5	- 3	+ 8	- 6	+ 5	- 4	+ 33	- 26

Meßergebnisse unter fließendem Verkehr

Temperaturdifferenzen im Überbau:

Bohrloch Nr.	Meß- stelle Nr.	Relativtemperaturen in K gegenüber der Temperatur in der Querschnittsschwerachse (Mittelwert Bohrloch 4)			
		14.12.1977	15.12.1977		
		22 h	8 h	12 h	Änderung v. 8 h bis 12 h
1	11	+ 0,2	- 0,5	- 0,3	
	12	± 0,0	- 0,1	+ 0,1	
	13	+ 0,1	- 0,3	+ 0,3	
	Mittel	+ 0,1	- 0,3	+ 0,1	+ 0,3
2	21	± 0,0	- 0,1	+ 0,3	
	22	± 0,0	- 0,1	+ 0,3	
	23	± 0,0	- 0,1	+ 0,4	
	Mittel	± 0,0	- 0,1	+ 0,3	+ 0,4
3	31	- 0,3	- 0,1	+ 0,4	
	32	- 0,6	- 0,1	+ 0,4	
	33	- 0,6	- 0,3	- 0,3	
		- 0,5	- 0,2	+ 0,2	+ 0,4
4	41	+ 0,1	± 0,0	± 0,0	
	42	± 0,0	± 0,0	± 0,0	
	Mittel	± 0,0 (Bezugswert)			
5	51	- 0,1	+ 0,1	- 0,1	
	52	± 0,0	± 0,0	- 0,3	
	Mittel	± 0,0	+ 0,2	- 0,2	- 0,4
6	61	- 0,5	± 0,0	+ 0,4	
	62	- 0,6	- 0,1	+ 0,4	
	63	- 0,5	- 0,2	± 0,0	
	Mittel	- 0,5	- 0,1	+ 0,2	+ 0,3
7	71	- 0,5	- 0,1	- 0,5	
	72	- 0,5	- 0,1	- 0,5	
	73	- 0,5	- 0,2	- 0,4	
	Mittel	- 0,5	- 0,1	- 0,5	- 0,4
8	81	- 0,3	- 0,1	- 0,4	
	82	- 0,2	- 0,1	- 0,4	
	83	± 0,0	- 0,1	- 0,3	
	Mittel	- 0,2	- 0,1	- 0,4	- 0,3
9	91	+ 0,3	- 0,1	- 0,0	
	92	+ 0,4	± 0,0	+ 0,3	
	Mittel	+ 0,3	± 0,0	+ 0,2	+ 0,2

: Lufttemperaturen in K am 15.12.1978:

Zeit	8 h	10 h	11 h	12 h	Änderung von 8 h bis 12 h
auf der Brücke	+ 5,6	+ 5,9	+ 6,2	+ 6,5	+ 0,9
unter der Brücke	+ 5,6	+ 5,9	+ 6,1	+ 6,4	+ 0,8
im Hohlkasten der Brücke	+ 6,1	+ 6,2	+ 6,2	+ 6,2	+ 0,1

Ergebnisse der Temperaturmessungen

Angaben in Mp und Mpm

Koppel- fuge	Lastfall										
	N_{bv}^o	M_{bv}^o	M_v^i	M_{bv}^i	M_2	M_{12}	$max\ H_{12}$	$min\ H_{12}$	$max\ H_{12}$ +1min H_{12}	M_{AT}^{+100}	
f	-2834	-801	+1569	+768	-74	-33	+396	-386	782	+799	
e	-2834	-801	+1362	+561	-212	-61	+477	-498	975	+657	
d	-2834	-801	+1422	+621	-172	-53	+508	-523	1031	+696	

Koppel- fuge	Laststellung										
	F1	F2	E1	E2	D1	D2		$ F1 $ -1721	$ E1 $ -1821	$ D1 $ -1021	
f	-299	-297	+79	+18	+18	-5		596	61	23	
e	-85	-235	-385	+312	+94	+13		320	697	81	
d	-24	+67	+110	-239	-389	+314		91	349	703	

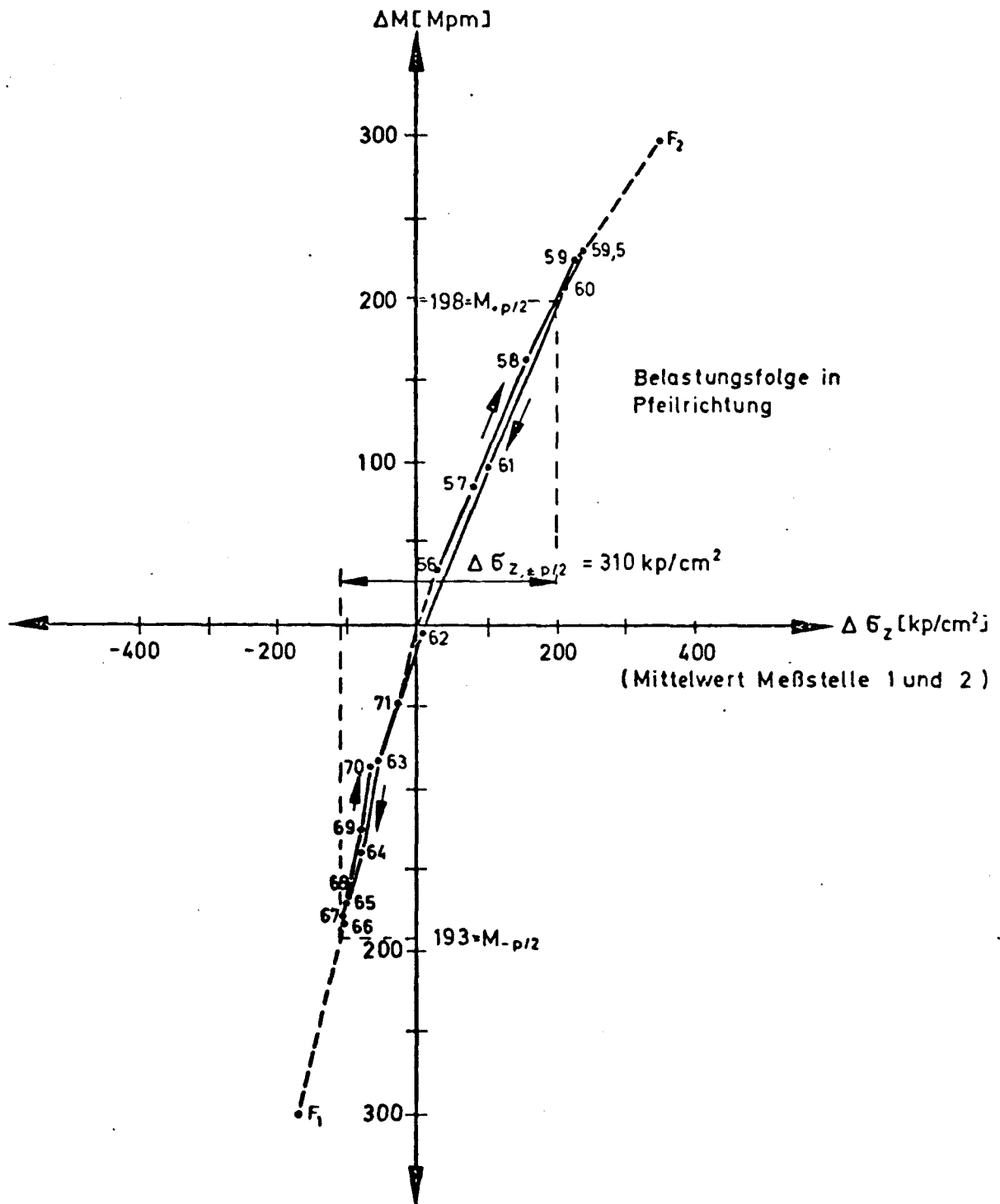
Koppel- fuge	Laststellung											
	5	15	25	30	34	35	36	37	38	39	39,5	
f	-0	-0	+1	+1	-2	-5	-3	-3	-3	-3	-2	
e	-0	-0	-2	-2	+5	+12	+8	+9	+9	+7	+6	
d	-0	-2	+6	+5	-2	+35	+43	+96	+175	+233	+237	

Koppel- fuge	Laststellung											
	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	49,5	
f	-2	-1	+1	+4	+6	+8	+10	+12	+11	+10	+9	
e	+5	+2	-3	-5	-2	+12	+43	+113	+174	+232	+237	
d	-212	+66	-55	-147	-200	-223	-218	-184	-155	-109	-85	

Koppel- fuge	Laststellung											
	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	59,5	
f	+7	-2	-4	-8	-8	+5	+34	+85	+157	+224	+229	
e	+211	+66	-59	-146	-199	-211	-216	-151	-152	-107	-83	
d	-62	-18	+17	+42	+57	+63	+62	+55	+44	+30	+24	

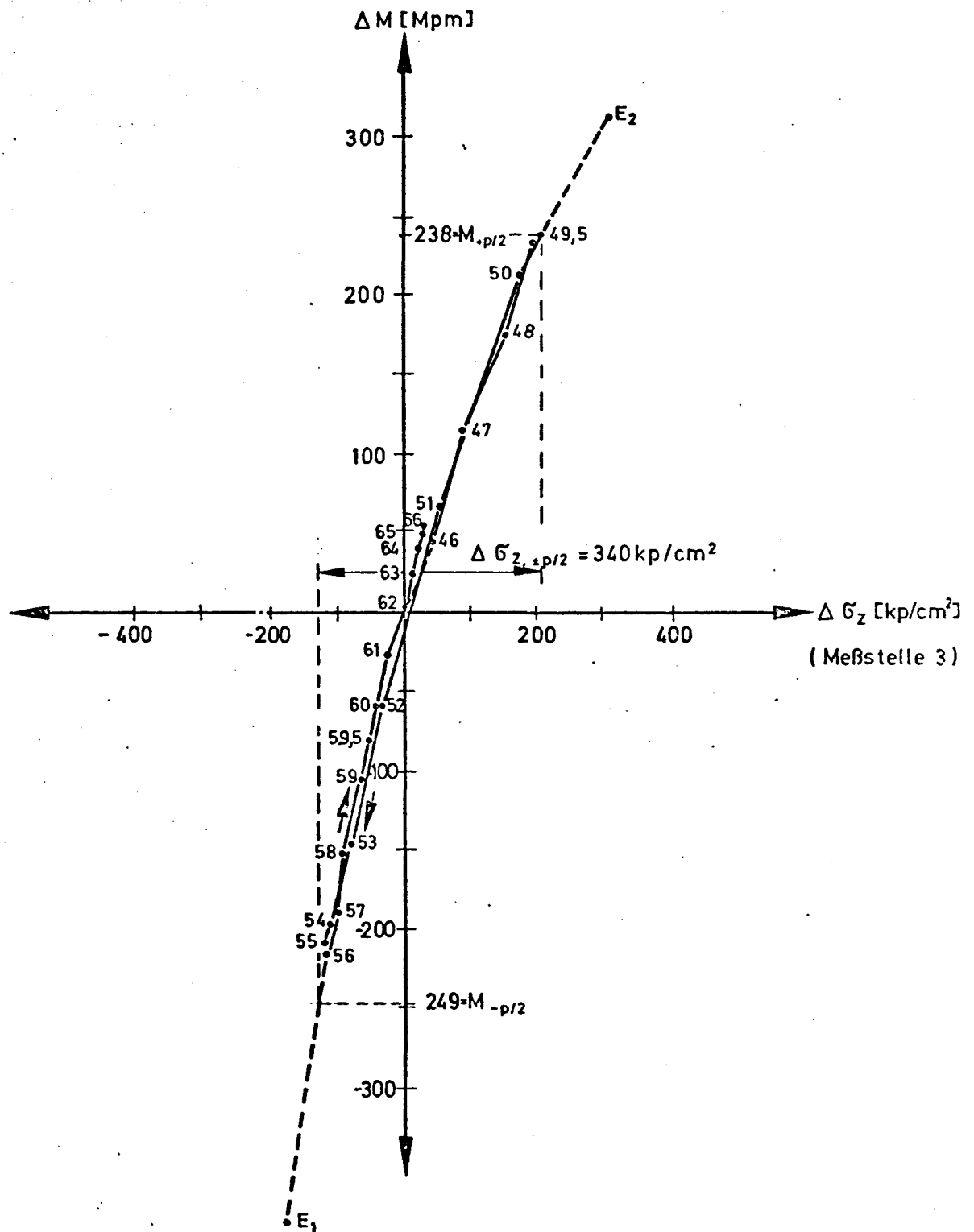
Koppel- fuge	Laststellung											
	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
f	-206	+97	-5	-83	-138	-171	-184	-179	-159	-127	-86	-48
e	-60	-27	+1	+24	+39	+49	+53	+51	+45	+36	+25	+14
d	+17	+8	-0	-7	-11	-14	-15	-15	-13	-10	-7	-4

Schnittgrößen des Brückenüberbaues



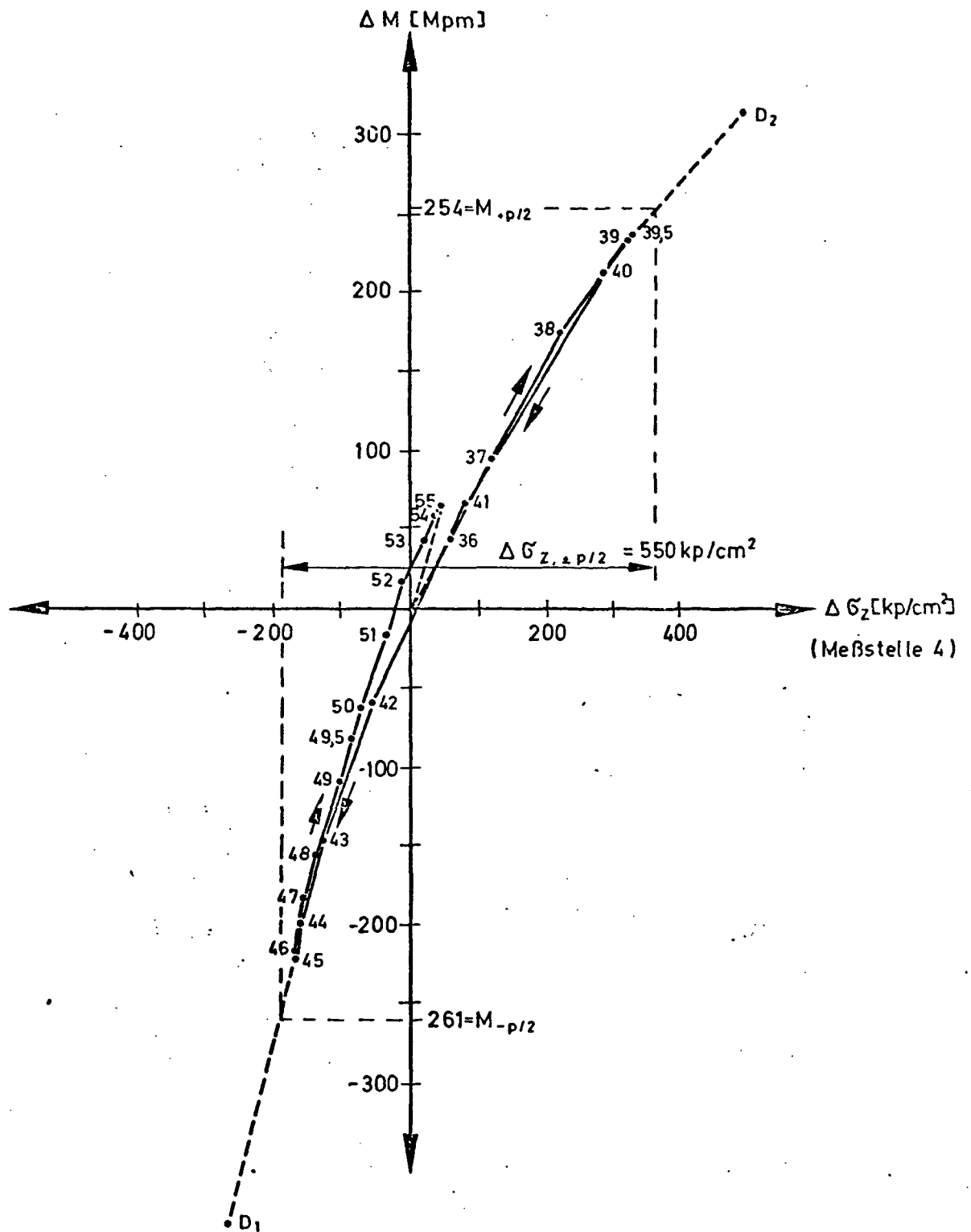
Koppelfuge f

$\Delta M - \Delta \sigma_z$ - Diagramm der untersten Spanngliedlage



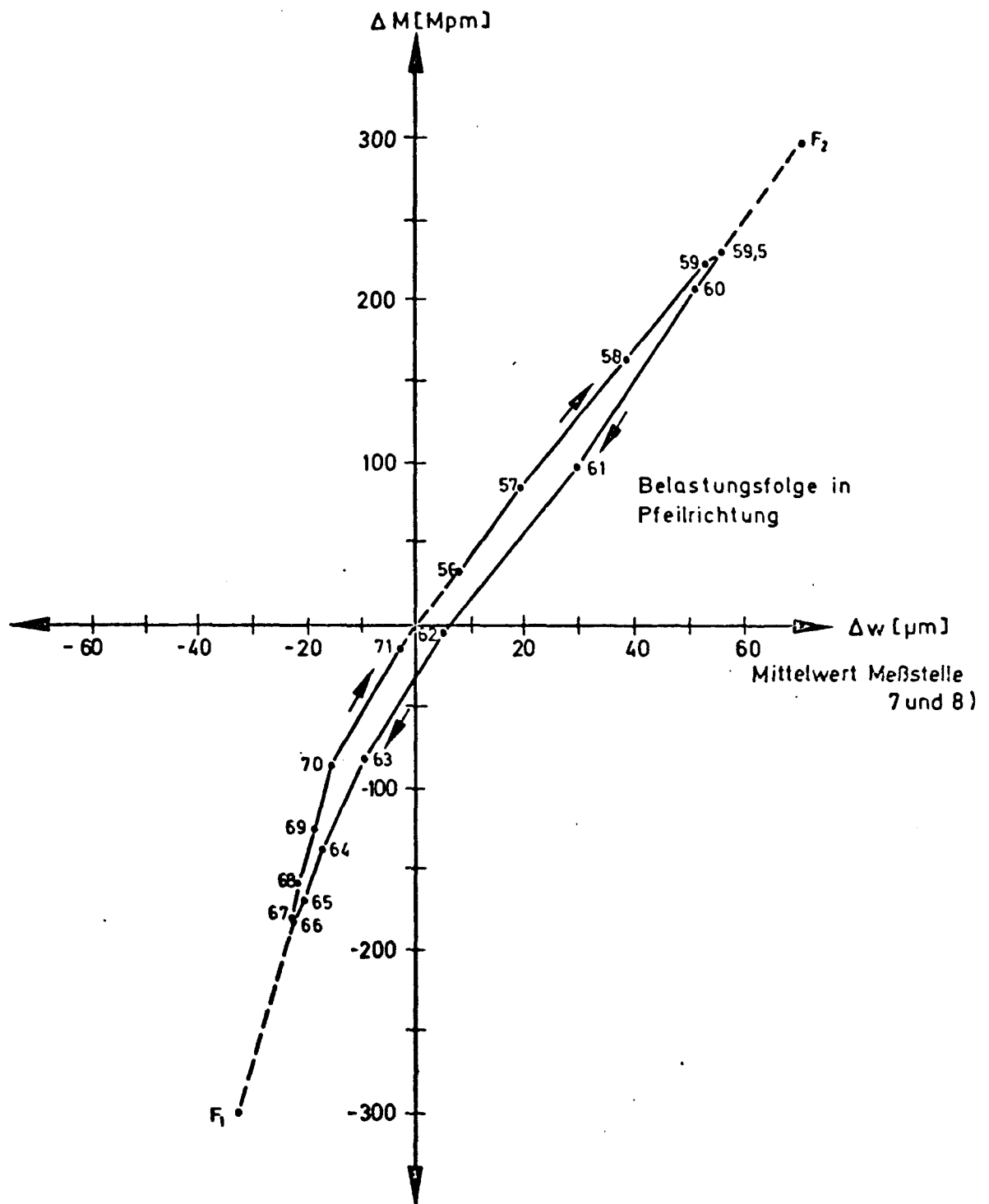
Koppelfuge e

$\Delta M - \Delta \sigma_z$ - Diagramm der untersten Spanngliedlage



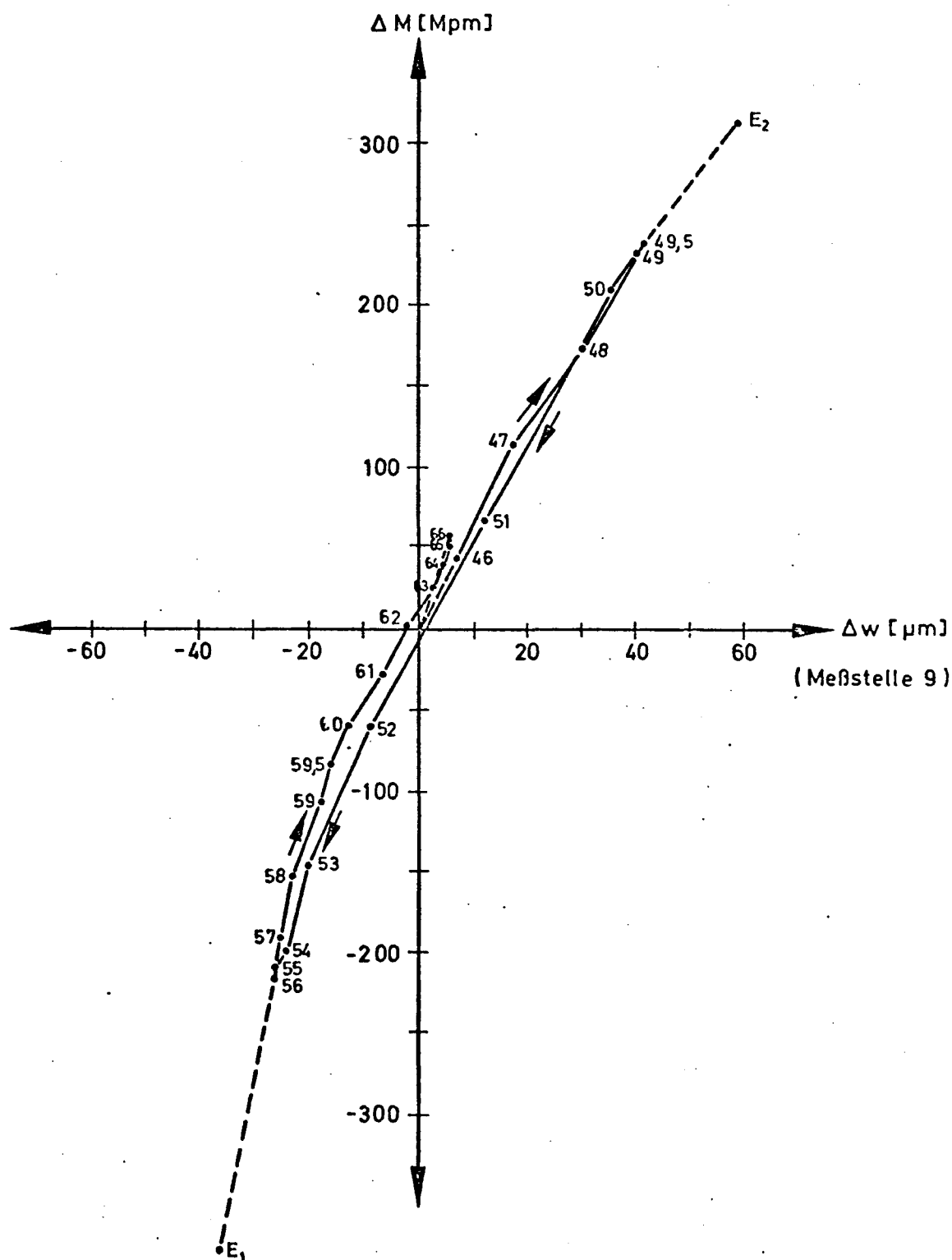
Koppelfuge d

$\Delta M - \Delta \sigma_z$ - Diagramm der untersten Spanngliedlage



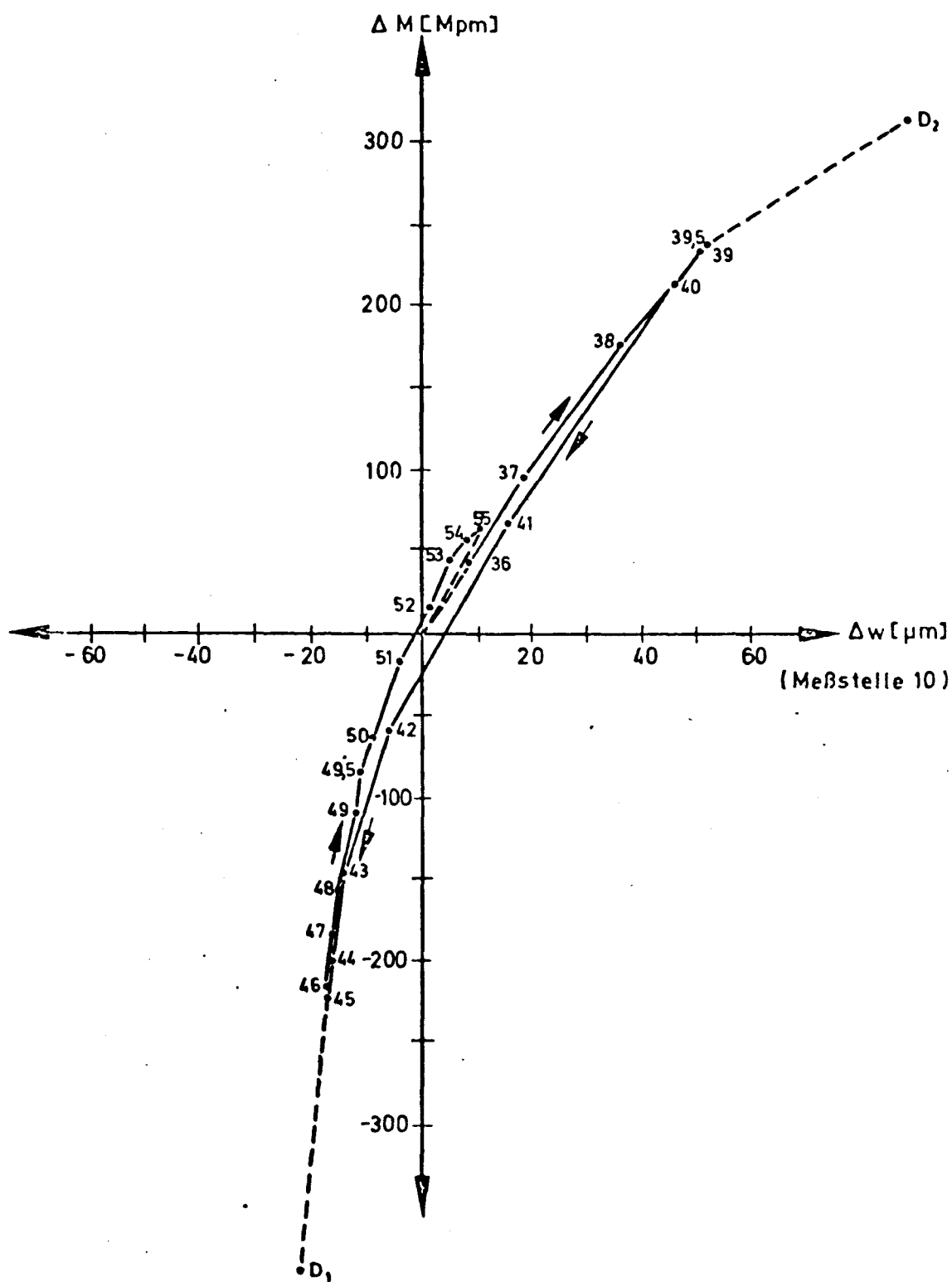
Koppelfuge f

$\Delta M - \Delta w$ - Diagramm



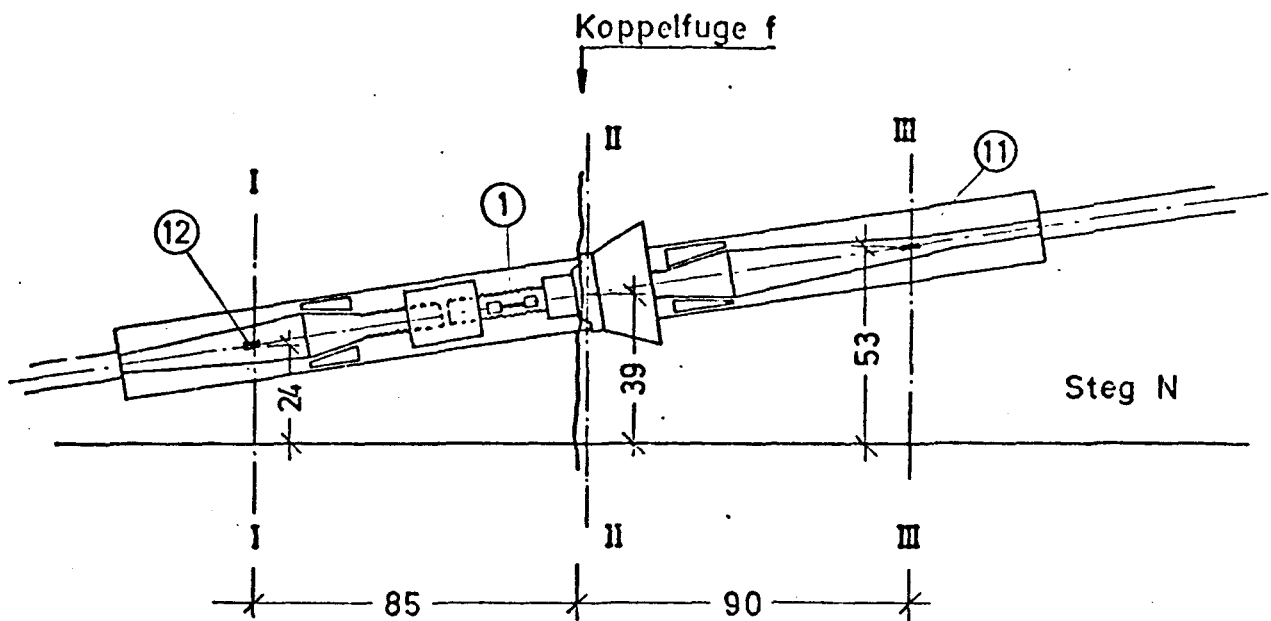
Koppelfuge e

$\Delta M - \Delta w$ - Diagramm



Koppelfuge d

Δ M - Δ w - Diagramm



Auswertung der Meßergebnisse:

$$\Delta\sigma_{zi} = \Delta Z/F_z = \Delta\epsilon_z \cdot E_z \quad \text{am Spannstahl (Meßstelle 11 und 12)}$$

$$\text{bzw.} = \Delta\epsilon_A \cdot E_A \cdot F_A/F_z \quad \text{am Anker (Meßstelle 1)}$$

$$E_z = E_A = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kp/cm}^2$$

$$F_z = 24,0 \text{ cm}^2 \quad F_A = 32,2 \text{ cm}^2$$

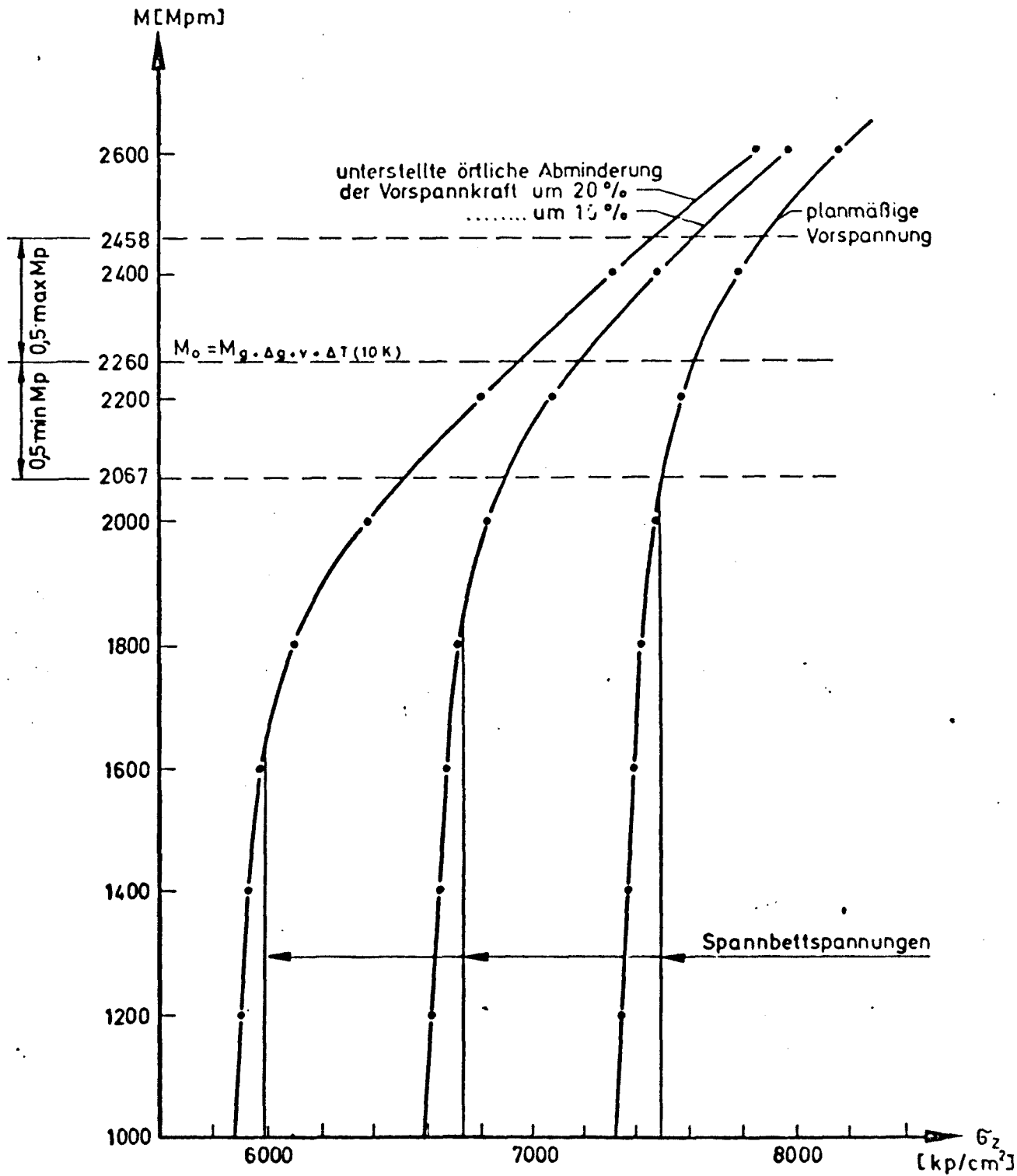
Rechnerische Spannungsermittlung im Zustand I:

$$\Delta\sigma_z = n \cdot \Delta M/J_b \cdot y_{bz} \quad \text{mit } n = 2,1 \cdot 10^6 / 3,55 \cdot 10^5 = 5,92$$

Schnitt		I - I		II - II (Koppelfuge)		III - III	
Meßstelle		12		1		11	
Differenz aus den Last- stellungen		$F_2 - F_1$	59,5-66	$F_2 - F_1$	59,5-66	$F_2 - F_1$	59,5-66
Auswertung der Meßergebnisse	$\Delta\epsilon_z [\mu\text{m/m}]$	59	-)*			36	23
	$\Delta\epsilon_A [\mu\text{m/m}]$			193	120		
	$\Delta\sigma_z [\text{kp/cm}^2]$	124	-	544	338	175	48
rechnerische Spannungser- mittlung im Zustand I	$\Delta M [\text{Mpm}]$	630	435	596	413	560	386
	$J_b [\text{m}^4]$	3,85		3,90		4,01	
	$y_{bn} [\text{m}]$	1,31		1,30		1,29	
	$y_{bz} [\text{m}]$	1,07		0,91		0,76	
	$\Delta\sigma_z [\text{kp/cm}^2]$	104	72	82	57	63	43

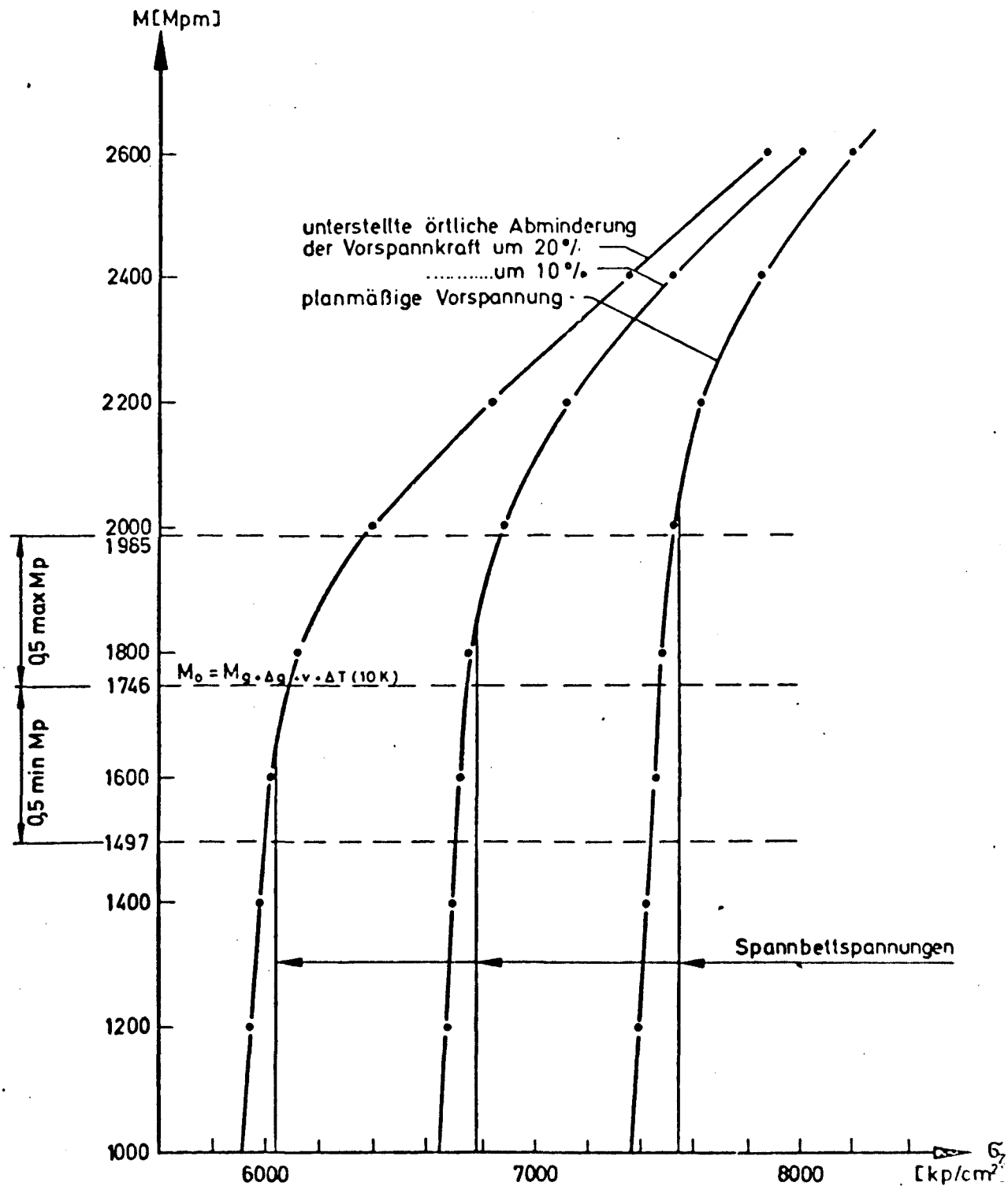
)* nicht gemessen

$\Delta\sigma_z$ im Bereich der Koppelfuge f , Steg N



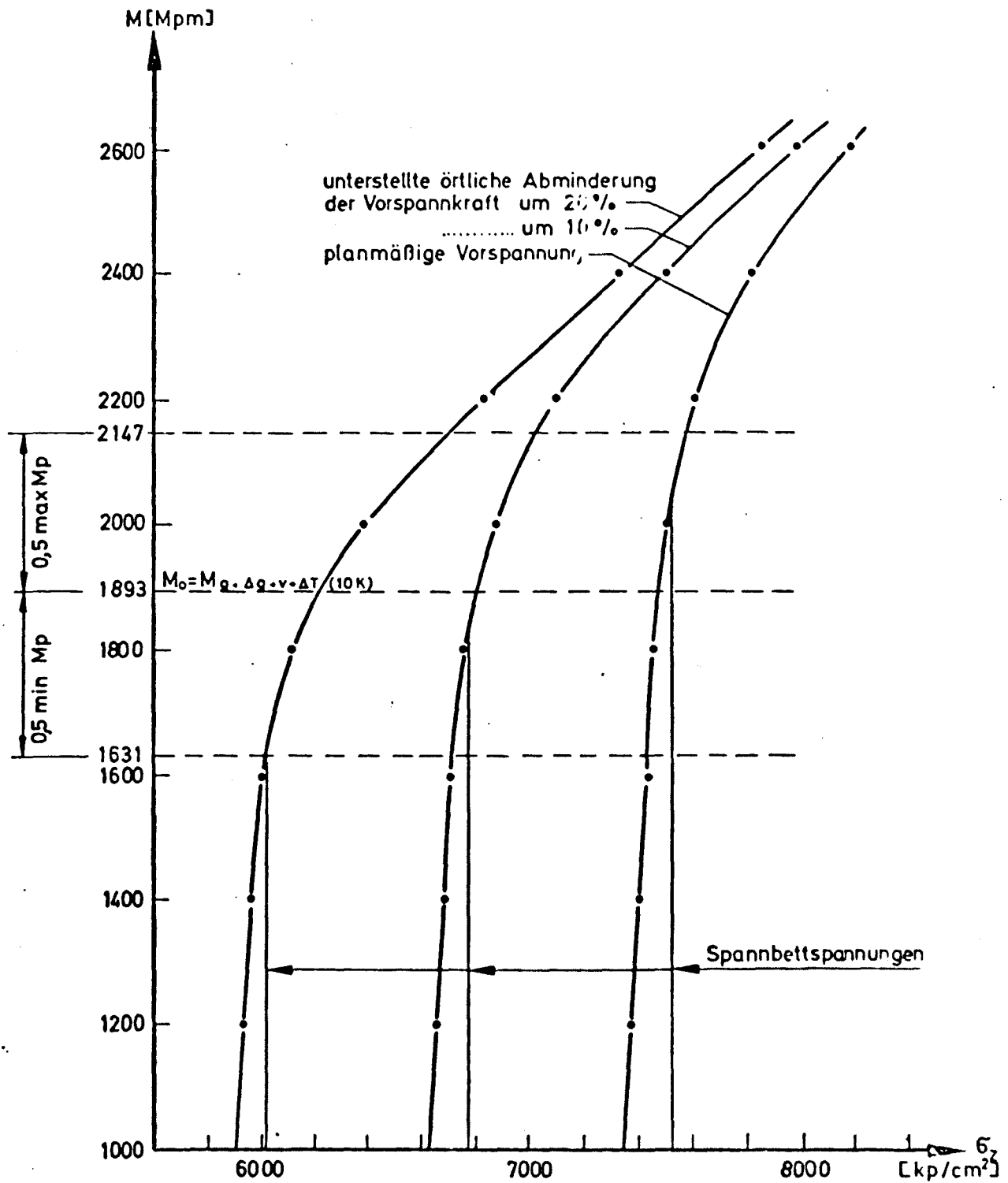
Koppelfuge f

M- σ_z -Diagramm der untersten Spanngliedlage



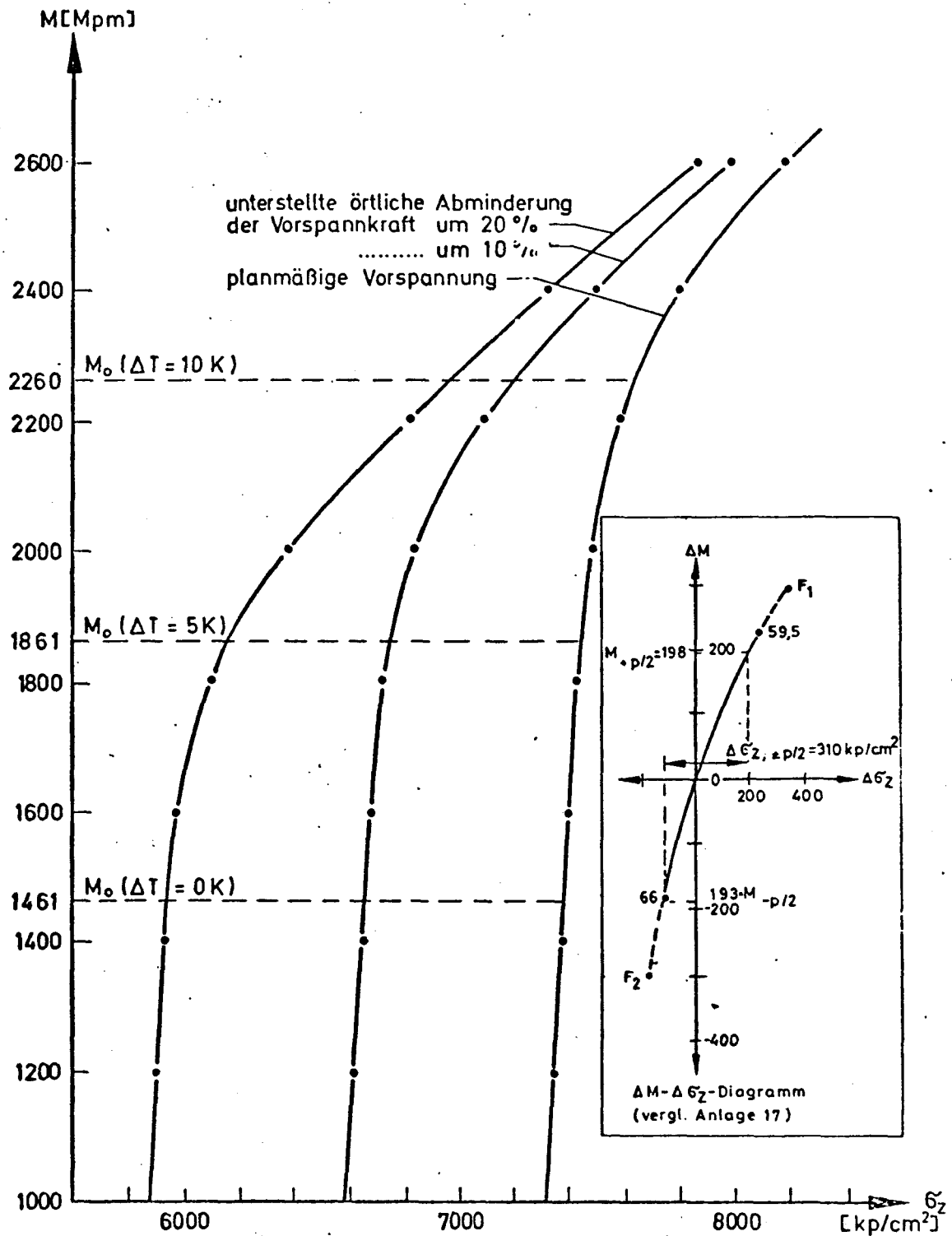
Koppelfuge e

M- σ_z -Diagramm der untersten Spanngliedlage



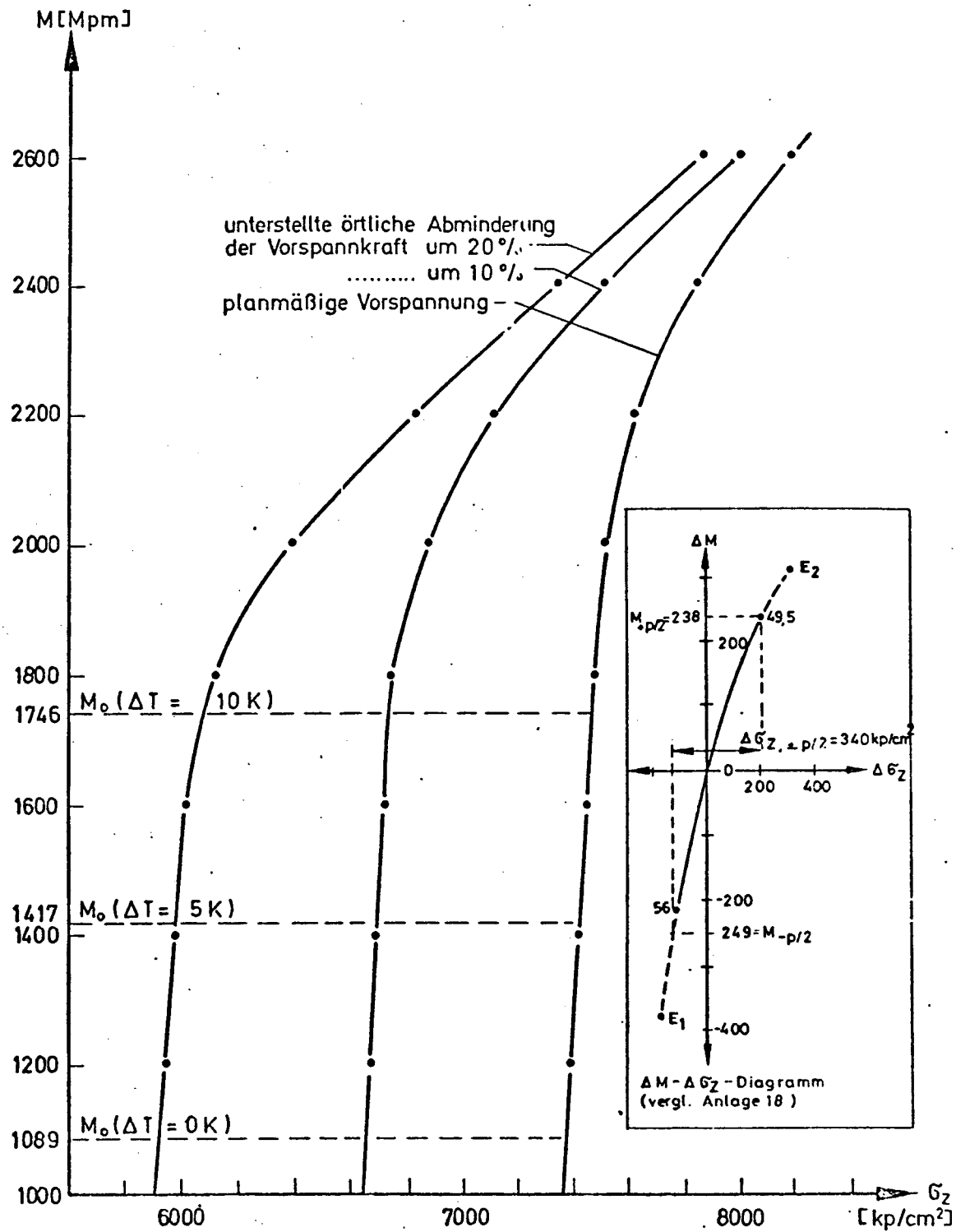
Koppelfuge d

M - σ_z - Diagramm der untersten Spanngliedlage



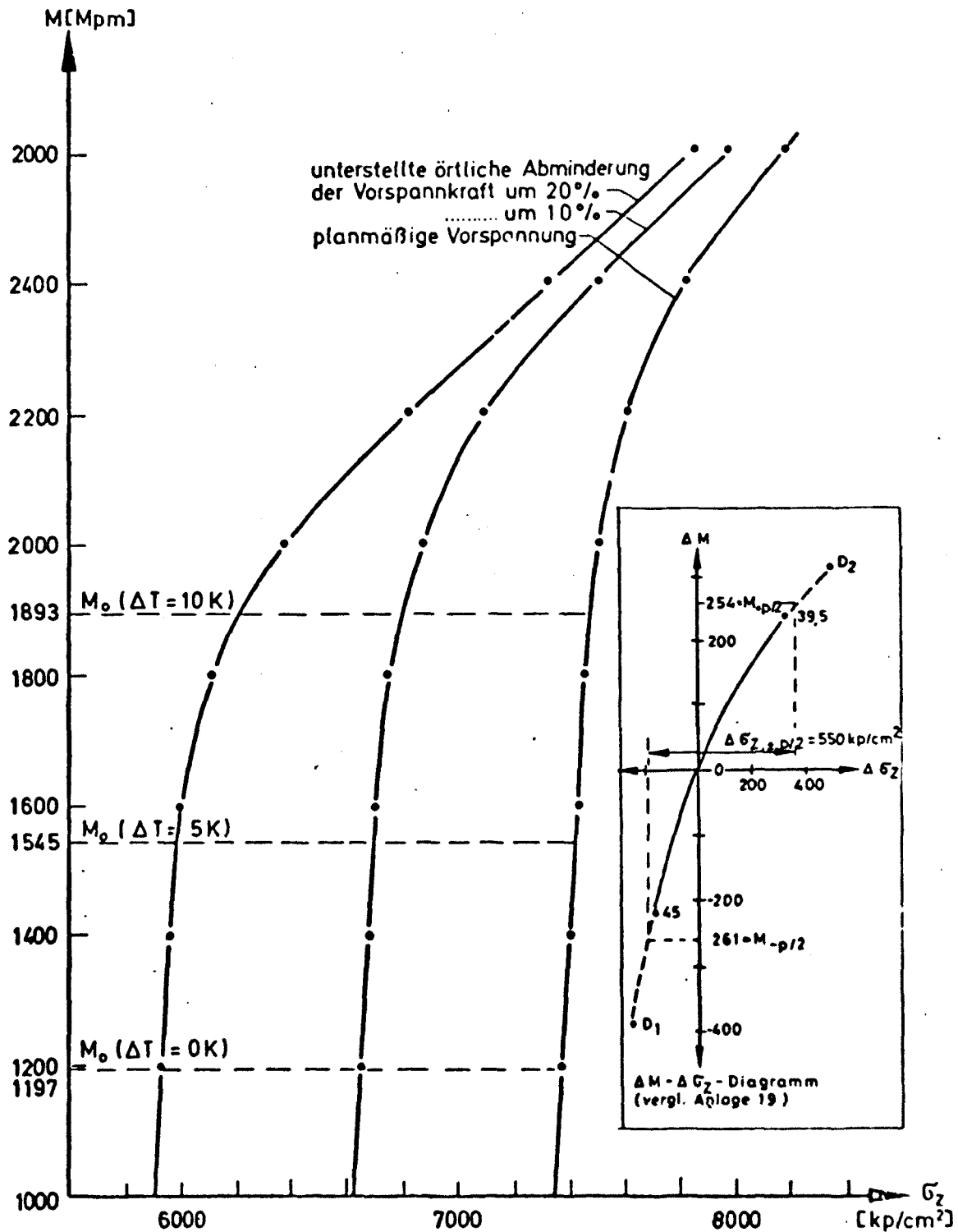
Koppelfuge f

M- σ_z -Diagramm der untersten Spanngliedlage



Koppelfuge e

M- σ_z -Diagramm der untersten Spanngliedlage



Koppelfuge d
 $M - \sigma_z$ -Diagramm der untersten Spanngliedlage